

# LA Recherche

L'actualité des sciences

## T-REX

*Ce qu'on  
a appris  
depuis  
Jurassic Park*



**Les ondes  
gravitationnelles  
du Big Bang**



**Le mystère des chats  
qui retombent sur leurs pattes**



M 01108 - 487 - F: 6,40 € - RD





# Les références de l'expert



## **Anthropologie médico-légale**

Géraud Quatrehomme

L'anthropologie médico-légale est l'application de l'anthropologie aux enquêtes criminelles ou à d'autres situations où l'identification des individus, à partir de restes ou squelettes, est primordiale. Les techniques d'identification mises en œuvre, qui doivent être rigoureuses, sont détaillées dans cet ouvrage.

Éd. 2014 ■ 94 € ■ 800p.

**NOUVEAUTÉ**

## **Insectes, cadavres et scènes de crime**

Principes et applications de l'entomologie médico-légale

Damien Charabidze, Matthias Gosselin

Préface : Jean-Pol Beauthier

Cet ouvrage, un des rares sur le sujet, explique comment l'entomologiste médico-légal étudie les insectes nécrophages afin de dater l'heure du décès.

Éd. 2014 ■ 49 € ■ 280 p.

**NOUVEAUTÉ**



## **Traité de médecine légale**

Jean-Pol Beauthier

Préface : Valéry Hédouin, Patrice Mangin

La médecine légale est présente dans de nombreux domaines scientifiques et fait régulièrement la Une des médias. Cette deuxième édition, mise à jour et complétée, tient compte des aspects les plus novateurs de cette discipline.

Éd. 2011 ■ 115 € ■ 1056 p.





Sophia Publications  
74, avenue du Maine 75014 Paris  
Tél. : 01 44 10 10 10  
Fax : 01 44 10 54 30  
e-mail rédaction : [courrier@larecherche.fr](mailto:courrier@larecherche.fr)

Pour joindre directement par téléphone un membre de la rédaction, composez le 01 44 10, suivi des quatre chiffres placés après son nom. Par mail, libelliez l'adresse sur le modèle : [prenom.nom@larecherche.fr](mailto:prenom.nom@larecherche.fr) (sans accents).

La Recherche est publiée par Sophia Publications, filiale d'Artémis.

Président-directeur général et directeur de la publication  
**Philippe Clerget**

## ABONNEMENTS

### Tarif France :

1 an 12 n°, 67 €  
1 an 12 n° + 6 Dossiers de La Recherche, 99 €

Tarif international : nous contacter.

Tél. : 01 55 56 71 15  
00 (33) 1 55 56 71 15

E-mail : [abo.recherche@groupe-gli.com](mailto:abo.recherche@groupe-gli.com)

Adresse : Service abonnements La Recherche, 17 route des Boulangers 78926 Yvelines Cedex 9

Suisse : Edigroup  
Tél. : (0041) 22 860 84 01.

Belgique : Edigroup  
Tél. : (0032) 70 233 304

Achat de revues et d'écrans  
La Recherche - BP65 - 24, chemin latéral 45390 Puiseaux - 02 38 33 42 89

Directrice de la rédaction  
**Aline Richard**  
Assistante  
**Gabrielle Monroe (54 38)**

Rédacteur en chef  
**Luc Allemand**  
Rédactrices en chef adjointes  
**Sophie Coisne (54 20)**  
**Hélène Le Meur (54 21)**

Secrétaire générale de la rédaction  
**Catherine Caltaux (54 16)**

Chef des informations  
**Cécile Klingler (54 18)**

Chef de service  
**Marie-Laure Théodule (54 22)**

Rédacteurs  
**Rémi Canali (54 24)**  
**Vincent Glavieux (54 29)**

Conception graphique et direction artistique  
**Vincent Sainte Fare Garnot (54 13)**

1<sup>re</sup> rédactrice graphiste  
**Michèle Bourgeois (54 15)**

Service photo  
**Anne Viratelle (54 14)**

Secrétaire de rédaction  
**Morvan Léon (54 17)**

Responsable fabrication  
**Christophe Perrusson (13 78)**

Activités numériques  
**Emmanuelle Gérardin (54 52)**

A collaboré à ce numéro  
**Antoine Cappelle**

Directrice déléguée gestion et numérique  
**Dounia Ammor**

Responsable communication  
**Élodie Dantard (54 55)**

Directrice des ventes et promotion  
**Evelyn Miont (13 80)**

Vente messageries  
VIP-diffusion **Frédéric Vinot**  
numéro vert 0800 51 49 74

Directrice commerciale et marketing  
**Virginie Marliac (54 49)**

Responsable du marketing direct  
**Linda Pain (54 51)**

Responsable gestion abonnements  
**Isabelle Parez (13 60)**

Responsable comptabilité  
**Sylvie Poirier (12 89)**

Diffusion librairies  
**DIF'POP. Tél. : 01 40 24 21 31**  
Fax : 01 40 24 15 88

Directrice commerciale publicité et développement  
**Caroline Nourry (13 96)**

Directeurs de clientèle  
**Antoine Faure (12 57)**  
**Eddie Barazzuol (12 12)**

Responsable de clientèle, secteur culture  
**Françoise Hullot (12 13)**

Imprimerie  
**G. Canale & C.,**  
Via Liguria 24, 10071 Borgaro (TO), Italie.  
Dépôt légal à parution.

**OJD**  
PRESSE  
PAYANTE  
Diffusion  
Certifiée  
2012

Les titres, les intertitres, les textes de présentation et les légendes sont établis par la rédaction du mensuel. La loi du 11 mars 1957 interdit les copies ou reproductions destinées à une utilisation collective. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur, ou de ses ayants droit ou ayants cause, est illicite (article L.122-4 du Code de propriété intellectuelle). Toute copie doit avoir l'accord du Centre français du droit de copie (CFC, 20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris. Tél. : 01 44 07 47 70. Fax : 01 46 34 67 19). L'éditeur s'autorise à refuser toute insertion qui semblerait contraire aux intérêts moraux ou matériels de la publication. Commission paritaire : 0914K 85863. ISSN 0029-5671

# Espèce invasives : le coût pour l'Europe



PAR **Aline Richard**  
directrice  
de la rédaction

**I**l est tout plat, d'une couleur vert sombre tirant sur le noir, 5 centimètres de long et la bouche au milieu du ventre : c'est le plathelminthe *Platydemus manokwari*. Ce printemps, cet hôte non désiré venu de Nouvelle-Guinée s'est introduit en France, à la grande inquiétude des spécialistes de la biodiversité. Car ce ver plat figure dans la liste des 100 espèces exotiques envahissantes les plus néfastes, tant il menace les populations d'escargots – son principal festin – mais aussi les vers de terre, si importants pour la fertilisation des sols agricoles. Une nouvelle espèce invasive débarque en France, après les frelons asiatiques, prédateurs des abeilles, et l'écureuil de Corée qui menace l'écureuil roux, espèce endémique de nos forêts. L'accroissement du commerce international mais aussi le tourisme et le goût pour les souvenirs exotiques sont à l'origine de la poussée des invasifs. En Europe, on compterait 12 000 espèces étrangères, 15 % d'entre elles étant envahissantes, croissant rapidement. Même si l'on peut discuter du qualificatif d'invasif, force est de constater que ces espèces représentent un coût pour les pays hôtes : extinction des espèces locales, conséquences sur l'agriculture, le commerce, la santé animale et humaine... Au total, selon l'Union européenne, la facture s'établit à 12 milliards d'euros par an. Une liste noire et une loi sont en préparation en Europe.



## actualités

### 3 Éditorial

### 6 Courrier



### 8 L'événement Une moisson de nouvelles planètes

### 12 Cosmologie

Les premières preuves directes  
de l'inflation de l'Univers ont été  
détectées

**Archéologie** Une école de  
gladiateurs découverte en Autriche

### 14 Physique Le nylon et le fil de pêche font de bons mucus artificiels Environnement

Sur la trace des métaux dissous  
dans les océans

**Climat** Robert Vautard : « En 2045,  
le réchauffement climatique  
dépassera les 2°C en Europe »

### 16 Mathématiques

Les graines du tournesol alignées  
dans l'espace hyperbolique

**Environnement** L'acidification de  
l'océan trouble la vue des poissons

**18 Cognition** Certaines personnes  
sont spécifiquement insensibles  
à la musique

**Géophysique** La plus  
ancienne roche terrestre a bien  
4,374 milliards d'années

**Biologie** Une membrane de  
filtration extraite d'un arbre

### 20 Préhistoire

L'art du Magdalénien a évolué  
dans le temps et dans l'espace

**Technologie** Une membrane  
artificielle pour surveiller le cœur  
**Web du mois**

Les premiers Parisiens

**Astronomie**

Des nuages observés à la surface  
d'une naine brune

**22 Physique** Einstein a étudié l'idée  
d'un Univers stationnaire

**Sociologie** Les femmes signent  
trop peu d'articles scientifiques

### 24 Astronomie

Un astéroïde se disloque  
sous les yeux d'Hubble

**Technologie**

Les « Google Glass » dépistent  
des maladies

### 25 Politiques

L'Europe et les États-Unis vont  
s'associer pour explorer le cerveau

**Médias** L'information scientifique  
passe par Internet

[www.larecherche.fr](http://www.larecherche.fr)



#### POUR RECHERCHER

> Les archives  
du magazine :  
Trouvez les sujets  
qui vous intéressent  
dans une base  
de plus  
de 20 000 articles

#### POUR S'INFORMER

> L'actualité de la  
recherche, le blog  
des livres et l'agenda  
des manifestations  
scientifiques

#### POUR ACHETER

> Abonnement  
et vente d'anciens  
numéros  
> Livres  
sélectionnés  
par La Recherche,  
outils du chercheur

La Recherche sur Twitter... Rejoignez-nous sur Twitter pour un éclairage original sur la science  
et les technologies <http://twitter.com/maglarecherche>



26 **Dossier**

# T-Rex : enquête sur la star des dinosaures



28 Pourquoi c'est le dinosaure le plus étudié

par Jean Le Lœuff

32 Une histoire de famille enfin démêlée

par Thomas Holtz

38 Ce qui reste à découvrir sur T-rex

par Jean Le Lœuff

40 Les dinosaures avaient le sang chaud

par Romain Amiot

46 **Psychologie**

L'incroyable fraude de Diederik Stapel

par Jean-Philippe Braly

50 **Biologie**

Nos bactéries prédisent notre tour de taille

par Karine Clément et Joël Doré

54 **Histoire**

Le mystère des chats qui retombent toujours sur leurs pattes

par Greg Gbur

60 **Archéologie**

L'histoire mouvementée d'une allée mégalithique

par Claude Masset

64 **Économie**

Dette publique et croissance : des erreurs bien choisies

par Pablo Jensen et Antoine Parent

68 **Portrait Fabiola Gianotti**

« Annoncer le boson de Higgs a été une émotion indescriptible »

par Olivier Dessibourg



76 **L'entretien du mois**

avec Jean-Pierre Bourguignon

« Aller vers une fondation européenne pour la recherche ? »

Propos recueillis par Marie-Laure Théodule

80 **Déchiffrement**

Plus de 110 garçons pour 100 filles

par Géraldine Duthé

81 **Le grand débat**

La musique a-t-elle un pouvoir thérapeutique ?

avec Marisol Touraine et Hervé Platel

92 **Histoire de science**

Le voyage des blocs erratiques

par Marie-Christine de La Souchère

85 **Les livres**

96 **L'agenda**

98 **Curiosités**



## Objets mieux adaptés



Je me permets de vous faire partager une réaction à l'article de Marie Besse (*La Recherche* n° 484, p. 42) sur l'unité européenne des gobelets en forme de « cloche renversée ». Il y a un aspect que je n'ai pas vu abordé dans l'article et qui pourrait éventuellement être un élément complémentaire au travail qui y est présenté. L'idée serait que la diffusion du modèle de forme ait pu aussi être favorisée par son adéquation particulière à la fonction. Différents peuples auraient pu se réapproprier ce modèle (aujourd'hui on parlerait de copies), parce que cette forme était plus efficace qu'une autre. Est-ce que cette forme de cloche renversée était particulièrement adaptée à l'utilisation attendue d'un gobelet dans le contexte de l'époque ? Plus pratique à utiliser, plus solide qu'une autre forme, plus facile à fabriquer, plus économique en matière première, en énergie de production ?

• Courriel de Sylvain Durbecq

## Réponse de Marie Besse

Votre remarque est tout à fait pertinente. En effet, connaître la fonction des objets archéologiques en général, et des poteries en particulier, est un des buts visés dans nos

travaux. Pendant le Campaniforme, nous avons deux types de poteries. Une poterie grossière à fonction domestique, et les gobelets, fins et décorés, qui eux-mêmes ont une double fonction, domestique d'une part (nous avons retrouvé des restes alimentaires dans certains d'entre eux) et une autre fonction, qui, justement demande à être définie. Et c'est bien là la difficulté que vous avez clairement identifiée. Ces gobelets ne sont ni plus pratiques que d'autres, ni plus solides, ni plus faciles à fabriquer, la matière première est la même que pour la céramique domestique... Certains chercheurs ont proposé la fonction de mesure de volume, mais sans démonstration probante. Il me semble que ces gobelets attestent notamment, de par leur homogénéité stylistique, d'une volonté de montrer son appartenance à un réseau. Ce qui n'est pas incompatible, bien sûr, avec d'autres fonctions.

## Le numérique et le cerveau

D'après les extraits du livre d'Olivier Houdé (*La Recherche* n° 484, p. 66), « nos circuits neuroculturels se modifieront fonctionnellement, grâce aux apprentissages », afin de s'adapter au numérique, « ainsi qu'ils l'ont déjà fait efficacement,

dans le passé, pour l'écriture et la lecture ». Mais pour Jean-Michel Besnier (p. 76), « ces technologies numériques nient la complexité qui est au cœur de l'humain et fait sa richesse ». Notre cerveau serait-il capable de concilier différents modes de raisonnement, ou son adaptation aux technologies numériques se ferait-elle au détriment de notre façon actuelle de raisonner ?

• Courriel d'Estelle Le Godec

## Réponse d'Olivier Houdé

En soi, le cerveau n'est pas simplifié. Issu d'une très longue évolution biologique, chiffrée en million d'années, cet organe de la pensée a toujours 100 milliards de neurones et un million de milliards de connexions, aujourd'hui comme hier. Sa complexité n'est pas menacée. Il faut calmer les peurs, le cerveau humain va collectivement s'adapter aux écrans numériques. Encore faut-il aider chacun à le faire. L'enjeu est de bien positionner le curseur en tenant compte de ce que nous savons aujourd'hui du cerveau. Celui-ci fonctionne avec trois systèmes : le système 1 est intuitif et rapide et, devant l'écran, il est le plus sollicité. Lui seul correspond aux automatismes de « l'Homme simplifié » décrit par le philosophe Jean-Michel Besnier. Le système 2 est logique, plus lent, plus réfléchi et on y fait moins appel de façon spontanée. Le système 3 active le cortex préfrontal, à l'avant de notre cerveau : c'est un système d'arbitrage qui va nous inciter à recourir au système 2 en inhibant les automatismes du système 1. L'objectif pour l'éducation est de favoriser ce processus chez l'enfant. J'appelle cela une pédagogie de la « résistance cognitive ». La démarche vise à prendre du recul pour raisonner. Cela exige de ralentir la pensée, ce à quoi le numérique ne nous invite pas

nécessairement. C'est le rôle des parents ou des enseignants d'exercer les enfants, dès le plus jeune âge, à raisonner pour trier, organiser et analyser les informations, tout en déjouant les pièges.

## Signaux non parcimonieux

Selon le dossier sur l'imagerie numérique (*La Recherche*, n° 484, p. 26), de nombreux types de signaux peuvent être considérés comme parcimonieux, des ondes sismiques à certaines variations génétiques. Dans quels domaines de recherche trouve-t-on des signaux non parcimonieux ?

• Courriel de Bernard Meunier

## Réponse d'Emmanuel Candès

Je ne suis pas certain qu'il faille regarder la question comme cela. En simplifiant un peu, des signaux non parcimonieux sont des signaux que l'on ne peut pas compresser avec haute-fidélité. Par exemple, on ne peut pas compresser du bruit blanc ou bien une séquence aléatoire de 0 et de 1 où chaque symbole apparaît avec une probabilité égale. En revanche, supposons que notre séquence ne contient que très peu de 1, par exemple 1 pour 1 000. Un signal de ce type est très redondant : on y verra de très longues suites de 0. L'acquisition comprimée peut donc s'appliquer. La parcimonie est une tendance et non une valeur numérique. Si l'acquisition comprimée échantillonne à un taux supérieur à celui de la parcimonie, alors tout se passe bien.

Sauf mention contraire de leur auteur, toute lettre parvenue à la rédaction de *La Recherche* est susceptible d'être éditée et publiée, en tout ou en partie, dans le journal. Les lettres concernant un auteur extérieur à la rédaction de *La Recherche* lui sont envoyées. Sans réaction de l'auteur dans un délai raisonnable, nous les considérons comme publiables en tout ou en partie, sans attendre une éventuelle réponse de sa part. Dans la mesure du possible, évitez les fax et les lettres manuscrites.



LES DOSSIERS DE LA Recherche

LES DOSSIERS DE  
**LA Recherche**

WWW.LA RECHERCHE.FR

**DLR**

#9 AVRIL/MAI 2014



**DRONES**  
UNE  
TECHNOLOGIE  
DE HAUT VOL

**OPEN DATA**  
LES GOUVERNEMENTS  
POUSSÉS À LA  
TRANSPARENCE

**RECYCLAGE**  
LA SECONDE VIE  
DES SMARTPHONES



**5**  
LES  
FAILLES DU  
WEB

# LES NOUVELLES DIMENSIONS DU SON

Acoustique 3D et hologrammes sonores

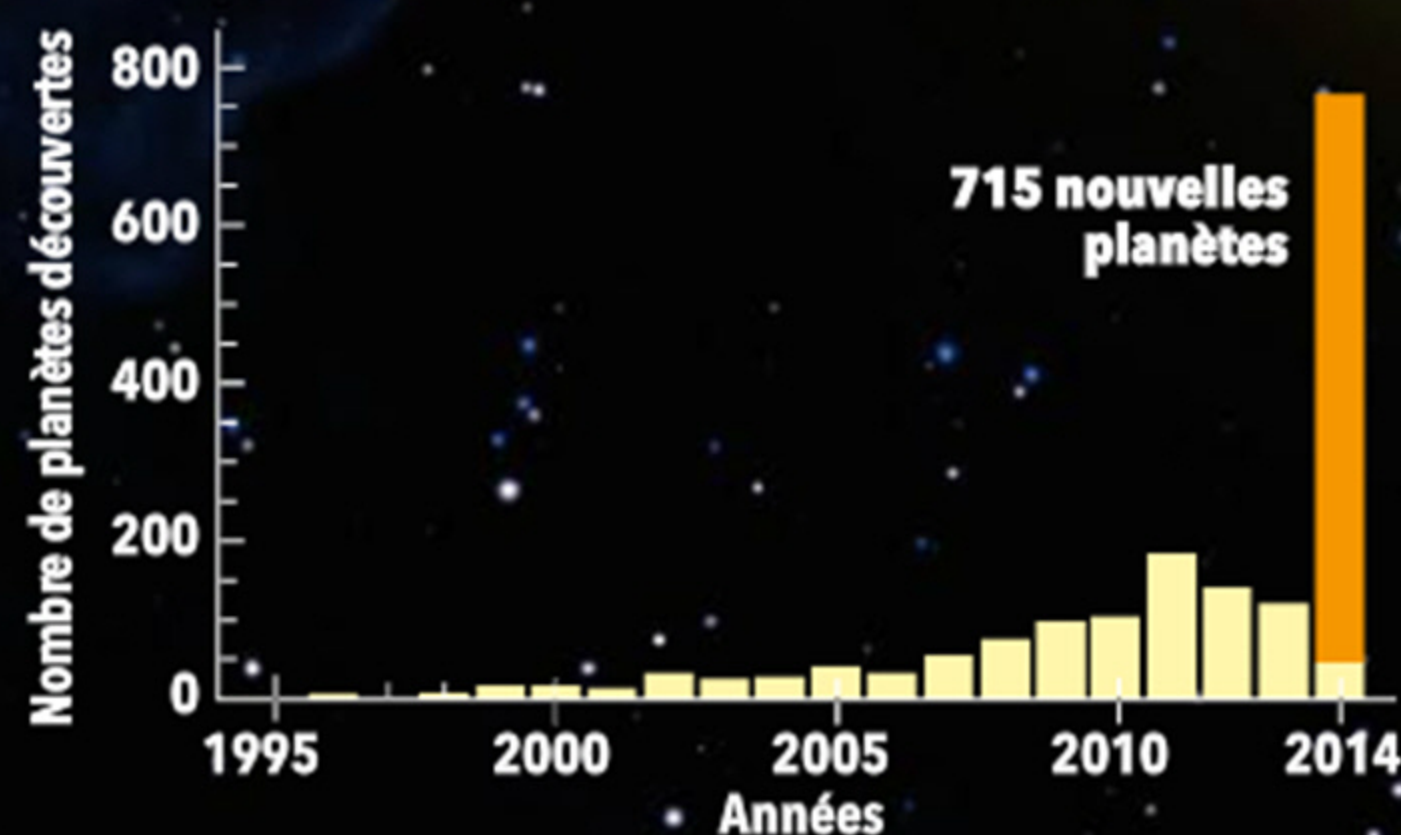
D 8,60 € - BEL 7,90 € - ESP 7,60 € - GR 7,60 € - ITA 7,60 € - LUx 7,60 € - PORT CONT 7,60 € - CH 13,80 FS - TUN 7,40 TND - MAR 6,9 DHs - CAN 10,99 \$ CAN - DOM 7,60 € - TOM SURFACE 1000 XPF - TOM A 17 € - 3809

## Les nouveaux rendez-vous high-tech

Hologrammes sonores,  
pirates du web, open data,  
drones, oculus rift,  
termite bioniques,  
bactéries modifiées...

**En vente chez votre  
marchand de journaux**





# Une moisson de nouvelles

La NASA a annoncé la découverte de 715 planètes extrasolaires, augmentant d'un seul coup le nombre de celles-ci de près de 70 %.

Par **Clément Delorme**, journaliste.

**D**ix-huit ans serait-il l'âge de la majorité en astrophysique aussi ? Quelques mois après le dix-huitième anniversaire de la découverte de la première planète extrasolaire, 51 Pegasi b, et tandis que le compteur dépassait à peine le millier, la NASA a en effet annoncé la découverte confirmée de 715 nouvelles planètes d'un seul coup [1]. Qui plus est, cette moisson n'est

issue que de quelques mois de réanalyse des observations réalisées entre 2009 et 2011 par le télescope spatial Kepler.

En 2009, Kepler a été placé en orbite autour du Soleil dans un mouvement qui suit celui de la Terre. Pendant les quatre ans et deux mois qui ont suivi (le télescope est tombé en panne en 2013), il n'a pas chômé. Sans discontinuer, il a observé jusqu'à 150 000 étoiles simultanément, dans une portion de

notre galaxie visible entre les constellations du Cygne et de la Lyre.

Les observations de Kepler reposent sur la photométrie : l'appareil enregistre en continu la variation de la brillance de chaque étoile en fonction du temps. La longue durée d'observation a permis d'identifier des étoiles affichant une baisse de luminosité périodique, signe qu'une ou plusieurs exoplanètes se trouvent peut-être en orbite. En effet,

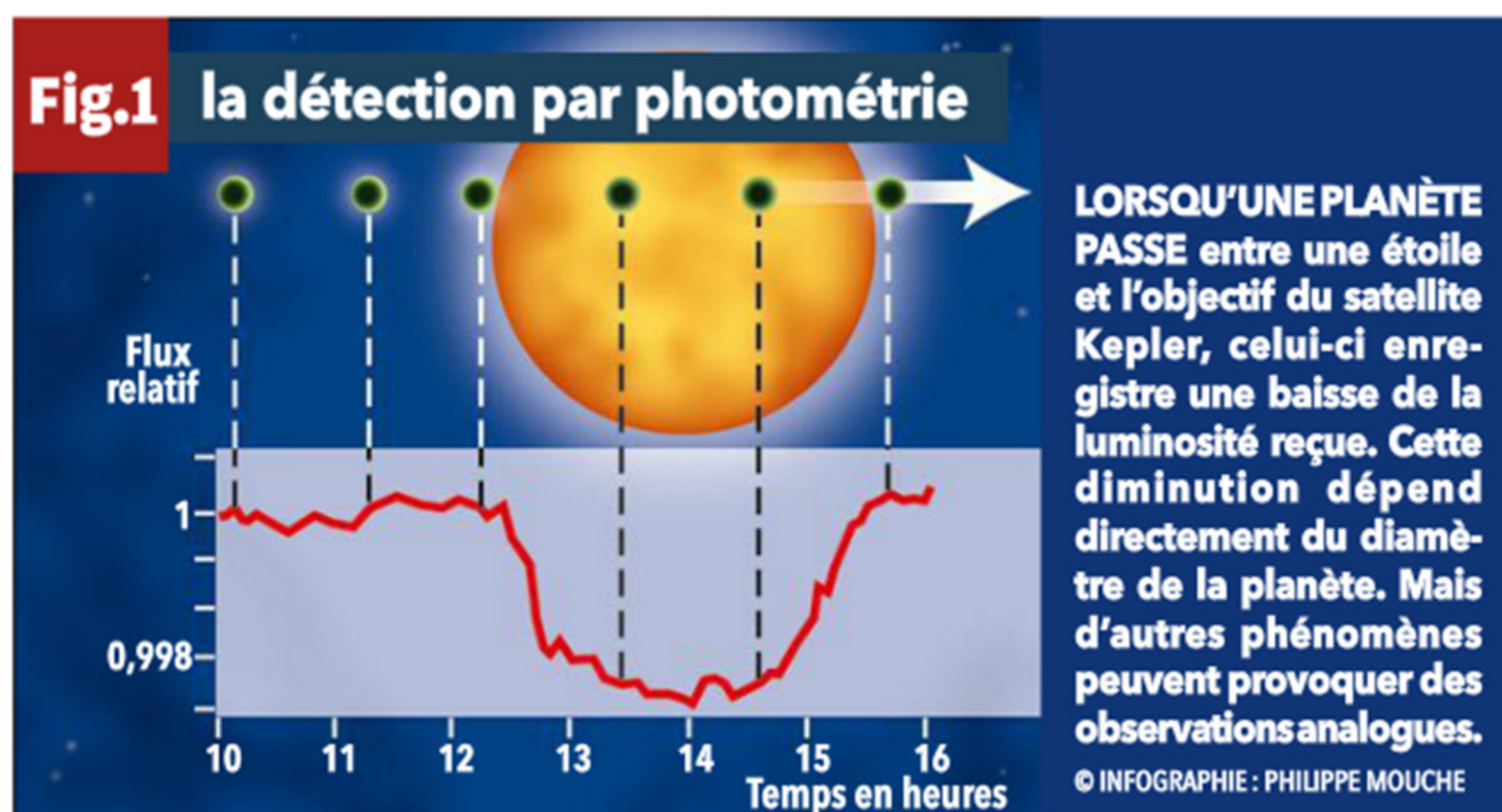


**Le nombre de planètes extra-solaires confirmées a bondi début 2014 (en orange), grâce à un nouveau traitement statistique des observations du satellite Kepler, reposant sur l'identification de systèmes multiplanétaires (vue d'artiste).** © TIM PYLE/NASA

lorsqu'une étoile est accompagnée d'une planète, à chaque fois que celle-ci passe entre l'étoile et l'objectif de Kepler, la luminosité baisse sensiblement [fig. 1].

Toutefois, cette méthode d'observation dite de « transit planétaire » ne sert habituellement qu'à identifier des « planètes candidates » dont il convient de vérifier par la suite l'existence à l'aide d'autres méthodes. « *La méthode de transit génère de nombreux faux positifs*, explique Christophe Lovis, de l'Observatoire de Genève. *Plusieurs autres mécanismes astrophysiques peuvent engendrer la baisse de luminosité d'une étoile en l'absence d'exoplanète.* » L'un des cas les plus fréquents concerne les systèmes d'étoiles binaires, où deux astres rapprochés tournent l'un autour de l'autre et s'éclipsent à tour de rôle.

Pour distinguer le vrai du faux, les astrophysiciens se plient donc normalement à une vérification par la méthode dite de « vélocimétrie ». Une étoile accompagnée d'une planète ou d'une autre étoile est en effet en orbite



gravitationnelle autour de ce compagnon. Vue de la Terre, l'étoile s'éloigne et se rapproche donc, alternativement, au rythme des orbites. Son rayonnement est ainsi légèrement modifié par effet Doppler\*.

**Variations de vitesse.** À l'aide d'un instrument au sol, tel Harps (acronyme anglais pour « chercheur de planète par vitesse radiale de haute précision »), installé sur le télescope de La Silla, au Chili, on mesure donc les variations de vitesse de l'étoile le long de la ligne de visée, autrement dit sa vitesse radiale. Et comme plus l'objet en orbite est massif, plus la vitesse radiale qu'il imprime est importante, la mesure de cette dernière permet de distinguer, parmi les compagnons possibles, une étoile d'une planète plusieurs milliers de fois plus légère. La vélocimétrie présente toutefois un inconvénient majeur : elle prend du temps. Pour obtenir un résultat fiable, on doit en effet enregistrer plusieurs révolutions d'une exoplanète autour de son étoile, phénomène qui peut durer, suivant la distance qui les sépare, entre quelques jours et quelques années.

Mais dans le cas présent, l'annonce de la NASA ne repose pas sur l'utilisation de la vélocimétrie. Comment Jack Lissauer et Jason Rowe, principaux auteurs des articles qui ont présenté ces résultats, et leurs collègues ont-ils procédé ? En fait, ils se sont intéressés à des systèmes stellaires

particuliers. Leur annonce ne concerne que des systèmes multiplanétaires, ceux où deux planètes au moins tournent autour d'une même étoile [2] [fig. 2]. Ainsi, les 715 nouvelles planètes sont en orbite autour de 305 étoiles seulement.

« *En traitant des systèmes multitransits, la NASA a pu prouver que la probabilité que leurs candidats soient des faux positifs est quasi nulle* », indique François Bouchy, du laboratoire d'astrophysique de Marseille. Pour étayer ses résultats, la NASA a donc montré que les différents scénarios à la source de faux positifs étaient peu probables dans les systèmes multitransits où plusieurs éclipses interviennent à des périodes différentes. « *Dans un premier temps, les astronomes américains ont examiné à la loupe les courbes de lumières de chaque étoile afin de différencier les transits planétaires des transits stellaires qui n'ont pas exactement la même forme. Les éclipses stellaires ont une forme en "V" et sont plus prononcées en termes de contraste lumineux, que les éclipses planétaires en "U" plus difficiles à observer* », précise l'astrophysicien.

Comme si les transits de systèmes d'étoiles binaires ne ressemblaient pas assez à ceux dus à des planètes, il arrive parfois que l'éclat d'une troisième étoile brillante, située en arrière-plan, se superpose à la lumière des deux étoiles liées. Le contraste des éclipses qu'elles créent est alors réduit. Pour s'assurer qu'ils n'assistaient pas à ce phénomène de contamination par une troisième étoile lointaine, les astronomes ont analysé la position du barycentre photométrique de chaque pixel du capteur de Kepler : ils ont ainsi vérifié que les variations >>>

\*L'EFFET DOPPLER est la modification de la longueur d'onde du rayonnement d'une source en mouvement par rapport à l'observateur.

# planètes

## L'essentiel

> LA NASA a annoncé la découverte de 715 nouvelles planètes grâce au télescope spatial Kepler.

> TOUTES CES PLANÈTES se trouvent dans des systèmes où au moins une autre planète tourne autour de la même étoile.

> L'OBSERVATION de systèmes multiplanétaires permet de s'affranchir de vérification par des télescopes au sol.



## Une moisson de nouvelles planètes

» lumineuses proviennent bien de l'étoile à laquelle ils s'intéressent.

Enfin, pour consolider encore ses conclusions, la NASA a estimé, au moyen de simulations, la stabilité dynamique des systèmes multitransits. Le raisonnement est le suivant. Si le transit observé n'est pas planétaire, il ne peut être que stellaire. Dans un système multitransit que se passerait-il si l'on avait des étoiles à la place des exoplanètes ?

Réponse des simulations : le chaos. Les interactions entre étoiles autour d'un astre principal avec des orbites très proches les unes des autres déstabiliseraient le système, avec à la clé des trajectoires erratiques et l'éjection d'étoiles dans l'espace. Impossible d'observer des variations périodiques de luminosité de l'étoile principale.

À partir de ces travaux fondés sur les données de Kepler et de nos connaissances actuelles de notre galaxie, telle la proportion d'étoiles binaires qui s'y trouvent, la NASA a estimé la fiabilité de ses résultats à 99 %. « L'étude est sérieuse, juge François Bouchy. Néanmoins, l'expérience acquise au travers des suivis réalisés au sol sur les candidats planétaires repérés par les télescopes spatiaux précédents nous dit que le taux de faux positifs reste élevé (de l'ordre de 70 % pour CoRoT, cousin européen de Kepler). Même pour l'appareil

américain, plus récent et donc plus précis, un tiers des candidats planètes géantes se sont révélés être des faux positifs. La NASA fait souvent preuve d'optimisme. »

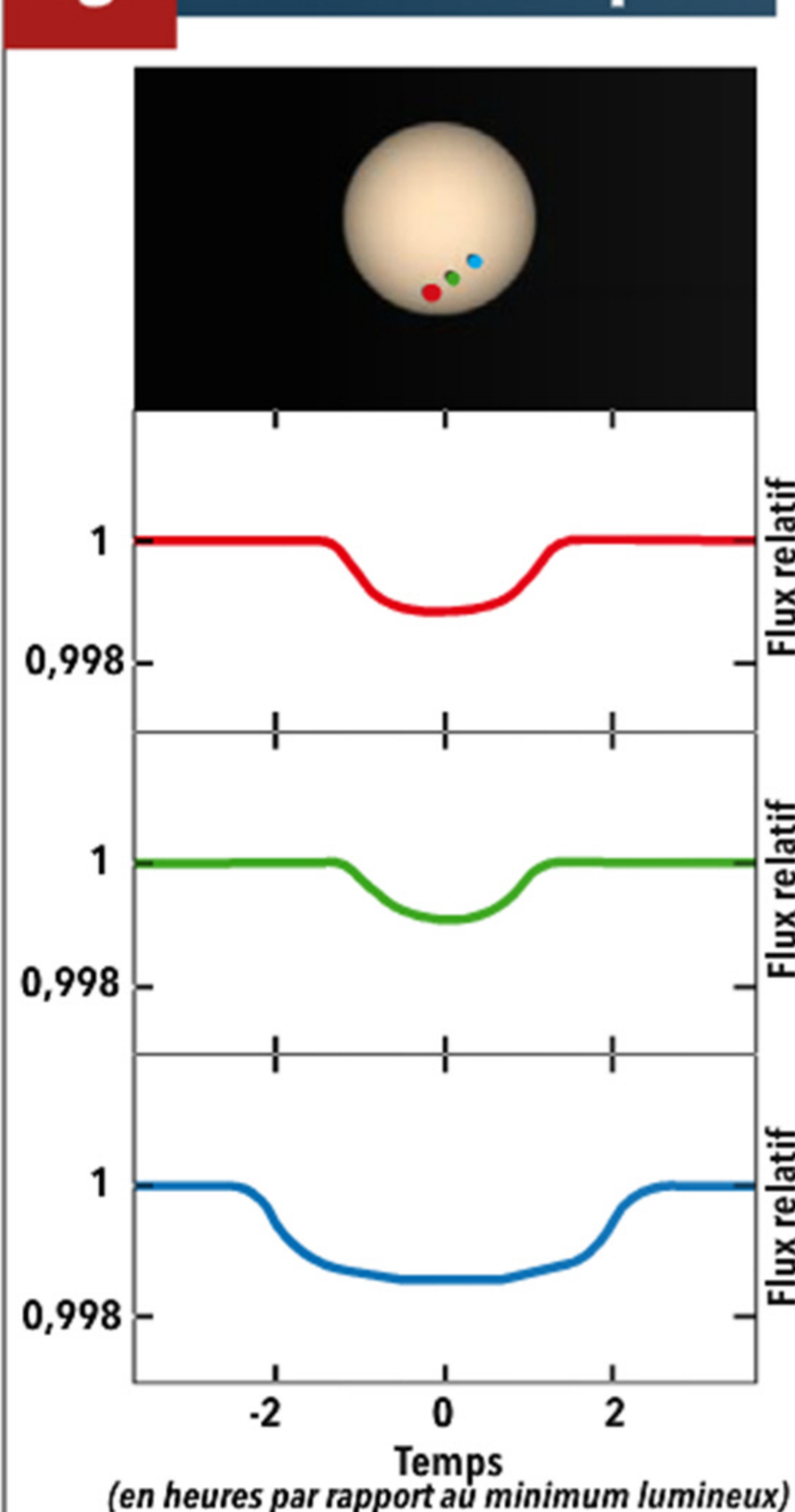
**Excitation et frustration.** L'annonce reste à la fois excitante et frustrante. Excitante, car elle apporte des preuves supplémentaires que, à l'instar de notre système solaire, les planètes des systèmes multiples ont leurs orbites toutes contenues approximativement dans le même plan. Par ailleurs, parmi les 95 % de planètes plus petites que Neptune (elle-même quatre fois plus grande que la Terre), on trouve quatre nouvelles planètes, 1,8 à 2,5 fois plus grandes que la Terre, situées dans les zones habitables de leurs étoiles, là où les conditions de température ne s'opposent pas à l'existence d'eau liquide, composante essentielle de la vie (même si les modèles actuels prévoient que ces planètes soient plutôt gazeuses).

Frustrante, car la majorité des planètes détectées par transit par Kepler ne seront pas observables depuis le sol, les étoiles autour desquelles elles orbitent n'étant pas assez lumineuses. Impossible alors de les caractériser, de connaître leur densité ou leur excentricité par exemple. Le télescope spatial ne fournit d'informations que sur leur taille et leur orbite, ce

## Des exoplanètes vues de la Terre

Il n'est pas indispensable d'envoyer un télescope dans l'espace pour découvrir de nouvelles planètes. Depuis le sol, et avec des budgets dix fois moins importants, on peut désormais observer directement le rayonnement infrarouge émis par des planètes chaudes récemment formées (de quelques dizaines à quelques centaines de millions d'années). « Grâce aux techniques d'optique adaptative et de coronagraphie, nous pouvons annuler 90 % de l'effet gênant produit par la turbulence de l'atmosphère et compenser l'énorme différence d'éclat entre la planète et son étoile, qui restreignaient beaucoup nos observations jusqu'à aujourd'hui », explique Jean-Luc Beuzit, de l'observatoire de Grenoble. Ainsi, en pointant son objectif sur une seule étoile, un télescope de 8 mètres peut identifier une planète en seulement une nuit. Les images permettent également d'entamer une analyse scientifique de la planète, en fournissant des informations sur sa masse, sa taille, sa température, et même sur les gaz qui composent son atmosphère.

Fig.2 Transits multiples



**PLUSIEURS BAISSSES PÉRIODIQUES** de luminosité observées sur une même étoile (courbes) indiquent que celles-ci sont dues à des planètes (points colorés sur le dessin; les proportions vis-à-vis de l'étoile sont respectées).

qui ne suffit pas pour comprendre la formation des systèmes multiplanétaires et de chacun de leurs membres.

Pour autant, Kepler n'a pas livré la totalité de ses secrets. L'annonce de la NASA ne s'appuie que sur les données collectées pendant les deux premières années du fonctionnement du télescope. En analysant les courbes de lumière enregistrées jusqu'à son arrêt, les astrophysiciens devraient encore ajouter à leur tableau de chasse de nouvelles planètes aux périodes de révolutions plus longues, situées plus loin de leur étoile. ■

[1] J. Rowe et al., <http://arxiv.org/abs/1402.6534>, 2014.

[2] J. Lissauer et al., <http://arxiv.org/abs/1402.6352>, 2014.

### Pour en savoir plus

» J.-F. Haït, Des superterres à perte de vue, *La Recherche*, février 2012, p. 30.

» <http://exoplanet.eu>



AIDER KARINE

C'EST AUSSI

AIDER ANTOINE ET BASTIEN

Faire un don à l'Association des Paralysés de France, c'est venir en aide aux personnes en situation de handicap mais aussi à tous les usagers de la ville. Que l'on soit en fauteuil roulant, avec une poussette ou simplement moins agile qu'avant, les obstacles sont les mêmes pour tous. C'est pourquoi le combat des personnes en situation de handicap pour une ville accessible à tous, c'est aussi votre combat. **Soutenez l'Association des Paralysés de France sur [www.apf.asso.fr](http://www.apf.asso.fr)**



17, bd Auguste-Blanqui 75013 PARIS - Tél. : 01 40 78 69 00

VOTRE DON, C'EST NOTRE FORCE

**BON DE SOUTIEN**

merci de retourner ce bon sous enveloppe non affranchie à :  
APF - Libre réponse N°54-90 - 75642 Paris cedex

APFAPD013



**OUI, je me mobilise aux côtés de l'Association des Paralysés de France (APF) en faveur des personnes en situation de handicap. Pour cela, je donne :**

☐ 15 €    ☐ 20 €    ☐ 30 €  
☐ 50 €    ☐ ..... €  
(autre montant)

**Je joins mon don à l'ordre de l'Association des Paralysés de France par :**

☐ Chèque bancaire ou postal  
☐ Carte bancaire n° .....

Date d'expiration : .....  
mois    année

Date ...../...../.....

**SIGNATURE :**

Nom ..... Prénom .....

Adresse .....

..... Ville .....  
Code postal

**DÉDUCTION FISCALE 66%**

**66 % de votre don à l'Association des Paralysés de France sont déductibles de vos impôts**, à concurrence de 20 % de votre revenu imposable. Ainsi, par exemple, un don de 30 € ne vous coûtera que 10,20 €. L'association bénéficiera bien de la somme de 30 €. Nous vous enverrons un reçu justificatif.



Conformément à la loi « Informatique et libertés » du 6 janvier 1978, vous bénéficiez d'un droit d'accès, de suppression et de rectification aux données vous concernant, en vous adressant directement au siège de l'APF. Vos coordonnées sont communiquées à nos services et aux organismes liés contractuellement à l'APF et peuvent être envoyées hors Union Européenne. Vous pouvez également vous opposer à ce qu'elles soient échangées ou cédées. Dans ce dernier cas, cochez la case ci-contre, ces informations seraient alors réservées à l'usage exclusif de notre association : ☐



# Cosmologie Les premières preuves directes de l'inflation de l'Univers ont été détectées

Des astrophysiciens américains ont présenté des preuves directes que l'Univers s'est étendu démesurément quelques fractions de seconde après le Big Bang.

**L**es astrophysiciens de la collaboration américaine BICEP2 viennent d'annoncer l'une des découvertes les plus retentissantes de l'histoire récente de la cosmologie. Grâce à son télescope de 26 centimètres de diamètre installé au pôle Sud, ce petit groupe dirigé par John Kovac, du département d'astronomie de l'université Harvard, aux États-Unis, aurait observé pour la première fois des traces directes de l'état de l'Univers quelques fractions de seconde après le Big Bang [1].

Traces qui confirment, selon eux, qu'il a subi très brièvement une expansion extrêmement rapide, que

l'on appelle l'« inflation » (son diamètre a été multiplié par au moins  $10^{50}$  en  $10^{-35}$  seconde).

Pour comprendre ce résultat il faut, une fois de plus, revenir à la théorie de la relativité générale, proposée par Albert Einstein en 1915. Celle-ci prévoit en effet l'existence de distorsions de l'espace-temps capables de se propager : des « ondes gravitationnelles ».

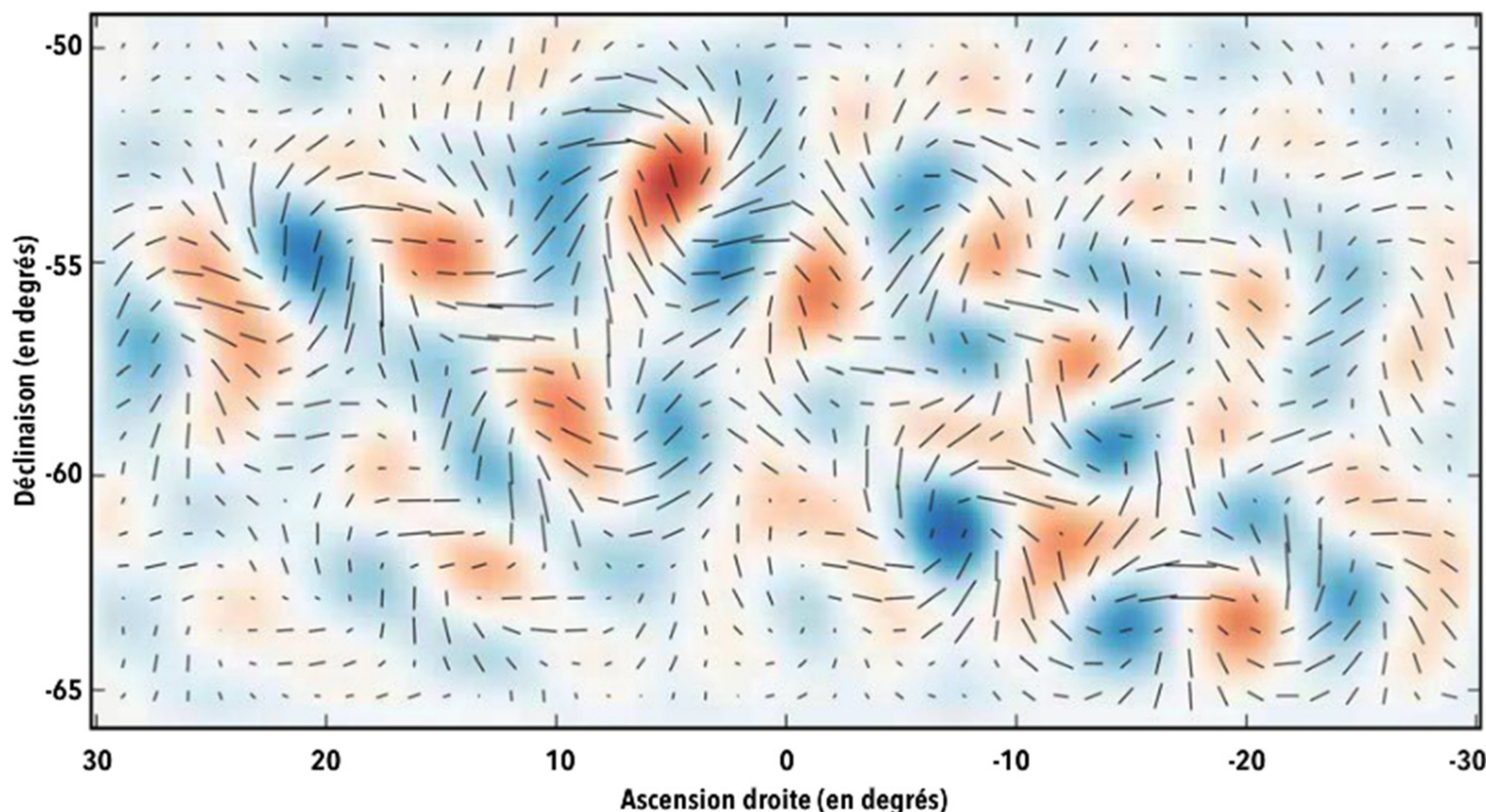
« Les modèles cosmologiques prévoyaient que des ondes gravitationnelles ont été créées par les fluctuations quantiques des champs de l'Univers primordial, pendant la période d'inflation », explique Nicolas Ponthieu, de l'institut de planétologie et de cosmologie de Grenoble. Comment détecter ces ondes

gravitationnelles primordiales ? En étudiant le fond diffus cosmologique, rayonnement électromagnétique visible dans toutes les directions, émis quand l'Univers était âgé d'environ 380 000 ans. « En distordant l'espace, ces ondes influent sur les mouvements de matière et de rayonnement au moment où le fond diffus se forme, détaille Nicolas Ponthieu. Elles produisent alors des fluctuations, notamment dans la manière dont ce rayonnement est orienté, polarisé. »

**Tourbillons.** Ce sont ces anomalies de polarisation que les membres de BICEP2 ont traquées. Et plus particulièrement l'une d'elles : les modes B. « Ces modes

prennent la forme de tourbillons, d'hélices », décrit Jean-Christophe Hamilton, du laboratoire astroparticule et cosmologie, à l'université Paris-VII Diderot. Pour les détecter, John Kovac et ses collègues ont cherché le lieu où les observations de leur télescope seraient les moins faussées. D'où le choix du pôle Sud : « C'est l'endroit le plus sec de la Terre, où il y a le moins de perturbations liées à l'atmosphère », confirme Jean-Christophe Hamilton. Les astrophysiciens ont par ailleurs braqué leur instrument sur une zone de 1 % du ciel qui offre une fenêtre d'observation sur le rayonnement du fond diffus cosmologique peu perturbée par d'autres

**LA RÉPARTITION** des plages bleues et rouges sur ce secteur du ciel prouve l'existence d'une phase d'expansion accélérée et exponentielle de l'Univers, peu après le Big Bang. Ces couleurs correspondent aux variations de polarisation observées par la collaboration BICEP2 dans le rayonnement émis alors que l'Univers était âgé de 380 000 ans. © THE BICEP2 COLLABORATION





émissions. Enfin, le télescope opérait sur une fréquence de 150 gigahertz, celle où le fond diffus émet le plus de photons.

**Perturbations.** Pendant près de 600 jours, les membres de BICEP2 ont ainsi accumulé les données, qu'ils ont ensuite analysées. Pour aboutir à la découverte de perturbations liées aux ondes gravitationnelles, avec moins d'une possibilité sur un million qu'il y ait une erreur.

« C'est un résultat extrêmement beau, qui semble correspondre aux prédictions des modèles d'inflation », s'enthousiasme Cécile Renault, du laboratoire de physique subatomique et de cosmologie de Grenoble. L'astrophysicienne, à l'image de tous ses collègues, souligne néanmoins la nécessité de lever certaines incertitudes : « Il faudra s'assurer que les mesures ne sont pas contaminées par les émissions de poussières galactiques ou par des biais instrumentaux. »

D'autres expériences devront confirmer cette découverte. On attend ainsi avec impatience les résultats des analyses analogues réalisées sur les données d'observation du satellite européen Planck, qui sont annoncés pour le dernier trimestre de 2014. ■ **Vincent Glavieux**

[1] Collaboration BICEP2, arXiv:1403.3985 et arXiv:1403.4302, 2014.

## → Bref

### → ÉTHOLOGIE

#### Oiseaux droitiers

Des éthologues australiens ont observé que, face à un obstacle, la moitié des perruches ondulées *Melopsittacus undulatus* passent systématiquement à gauche, et l'autre moitié systématiquement à droite. Lorsqu'ils volent en groupe, les oiseaux éviteraient ainsi les embouteillages.

P. S. Bhagavatula et al., *Plos Computational Biology*, 10, e1003473, 2014.

### → TECHNOLOGIE

#### WC à l'énergie solaire

À l'essai en Inde, des toilettes sèches financées par la fondation Gates pourraient améliorer les conditions sanitaires dans les pays en développement. Elles portent les excréments à très haute température en captant la chaleur du Soleil. L'objectif : les désinfecter pour en faire de l'engrais.

<http://colorado.edu/news>

### → CHIMIE

#### Prédictions de réactions

Dans une molécule, les liaisons qui relient les atomes vibrent en permanence, ce que l'on mesure par spectroscopie infrarouge. Des chimistes de l'université de l'Utah, aux États-Unis, ont mis au point un modèle qui relie précisément ces mesures aux réactions dans lesquelles peut s'engager la molécule.

A. Milo et al., *Nature*, 507, 210, 2014.

### Indicateur

# 3 millions

d'années, c'est l'âge de « Little Foot », australopithèque retrouvé en Afrique du Sud en 1994. C'est le mieux conservé jamais découvert.

L. Bruxelles et al., *J. hum. evol.*, sous presse

© MICHAEL KLEIN



**RECONSTITUTION VIRTUELLE** de l'école de gladiateurs de Carnuntum, en Autriche. Les archéologues ne l'ont pas fouillée mais étudiée grâce à des relevés géophysiques.

## Archéologie Une école de gladiateurs découverte en Autriche

Coups d'épée et lancer de filet : c'était le programme d'une école autrichienne antique. Au II<sup>e</sup> siècle apr. J.-C., les étudiants n'y apprenaient en effet pas à lire, mais à tuer, afin de devenir gladiateurs. Elle a été découverte dans la ville romaine de Carnuntum, à la frontière slovaque [1]. Celle-ci était la capitale de la province de Pannonie, centrée sur l'actuelle Hongrie. Elle s'était développée autour d'un camp de légionnaires protégeant la frontière de l'Empire romain. Plusieurs bâtiments civils bien conservés y ont été dégagés dès le XIX<sup>e</sup> siècle. Dans les années 1990, des photographies aériennes avaient révélé une structure près de l'amphithéâtre. Dans les années 2000, des prospections géophysiques avaient précisé qu'il s'agissait de fondations de murs. Depuis 2011, avec l'amélioration des techniques radar, des archéologues ont tracé un plan tridimensionnel de cette infrastructure avec une précision au centimètre près, sans ouvrir le sol pour fouiller. Cette école était un vaste complexe trapézoïdal, regroupant les cellules des gladiateurs, une arène d'entraînement, des bains ainsi que les bâtiments administratifs. Ses 2 800 mètres carrés et son état de conservation en font une découverte exceptionnelle. « Ce type d'édifice n'avait jamais été mis en évidence dans les provinces septentrionales, à l'exception des sites de Sarmizegetusa, en Roumanie, ou d'Autun, en France, mais dont les vestiges sont moins bien caractérisés », précise Mathieu Poux, de l'université Lumière-Lyon-II. ■ **Rémi Canali**

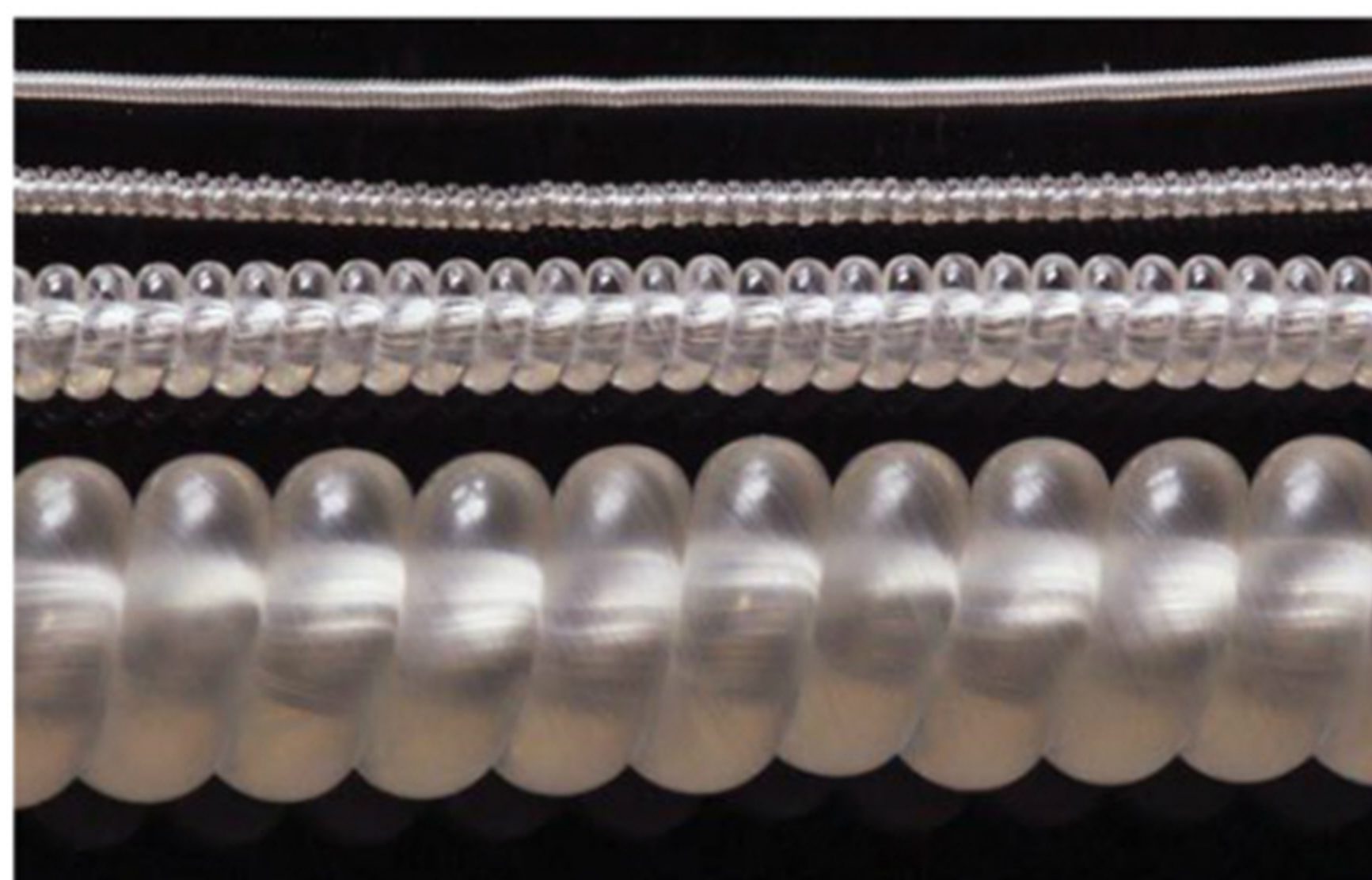
[1] W. Neubauer et al., *Antiquity*, 88, 339, 2014.



## Physique

### Le nylon et le fil de pêche font de bons muscles artificiels

**Q**uels sont les meilleurs matériaux pour fabriquer des muscles artificiels, dont on équiperait par exemple des robots ? La réponse n'est pas cousue de fil blanc, plutôt de fil de pêche et de fil à coudre. Des physiciens de l'université du Texas, aux États-Unis, ont démontré que ces matériaux supportent des charges 100 fois plus lourdes qu'un muscle humain de même taille et de même poids [1]. Les performances d'un muscle artificiel sont liées à ses capacités de contraction. Les physiciens américains avaient, il y a quelques années, étudié celles de fils à base de nanotubes de carbone. Ces derniers, minces



**C'EST EN TORSADANT DU FIL DE NYLON** (sur la photo, zoom progressif) de haut en bas, puis en les chauffant, que Ray Baughman et ses collègues ont créé un supermuscle artificiel. © COURTESY OF SCIENCE/AAAS

feuillets de graphite enroulés, sont en effet considérés comme un matériau prometteur pour de nombreuses applications. Mais ils ont constaté que celles du fil de pêche (à base

de polyéthylène) et du fil à coudre (en nylon) sont meilleures. Ils ont pour cela torsadé des fibres de nylon ou de polyéthylène et les ont chauffées, jusqu'à 240 °C pour le nylon, et jusqu'à

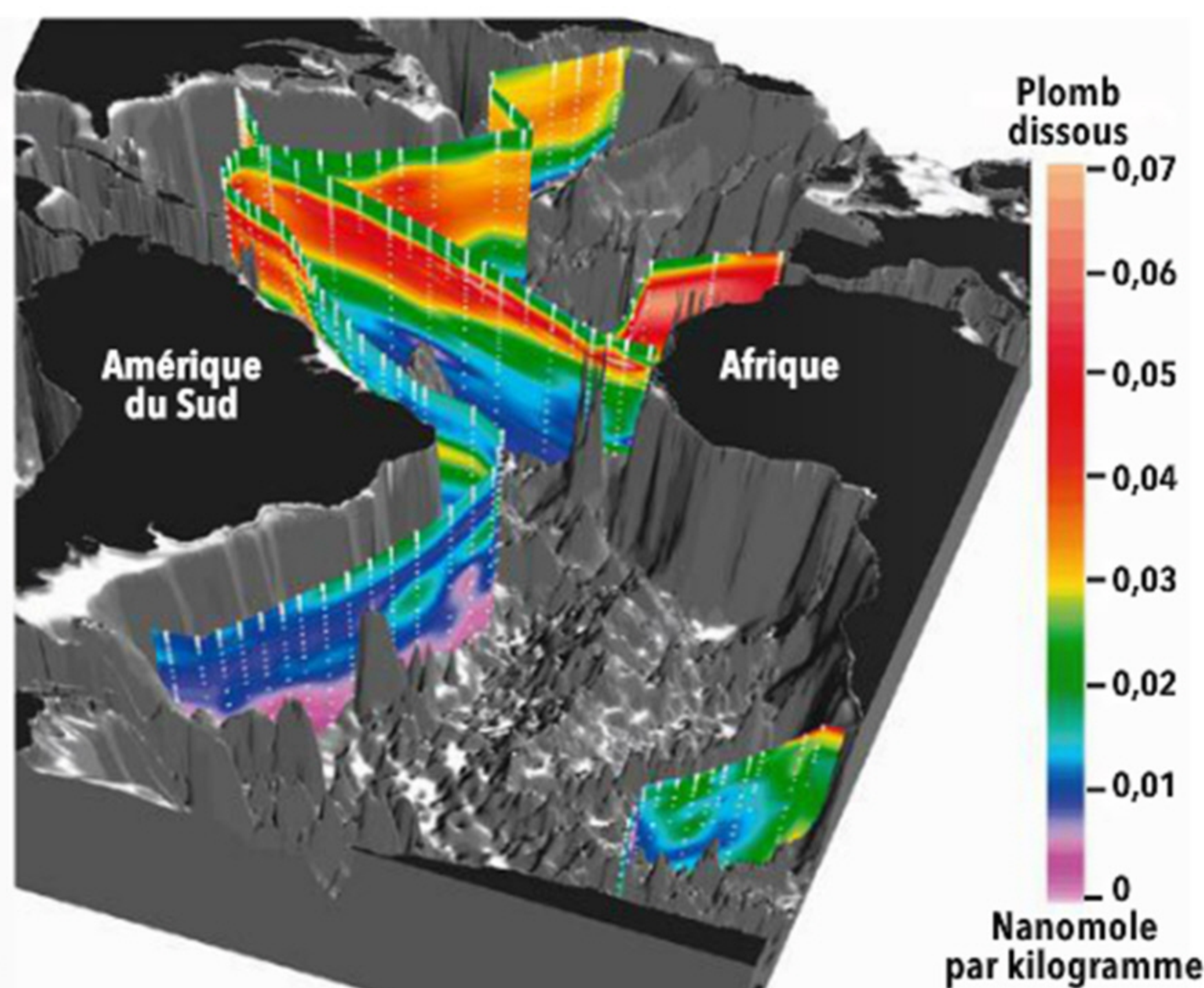
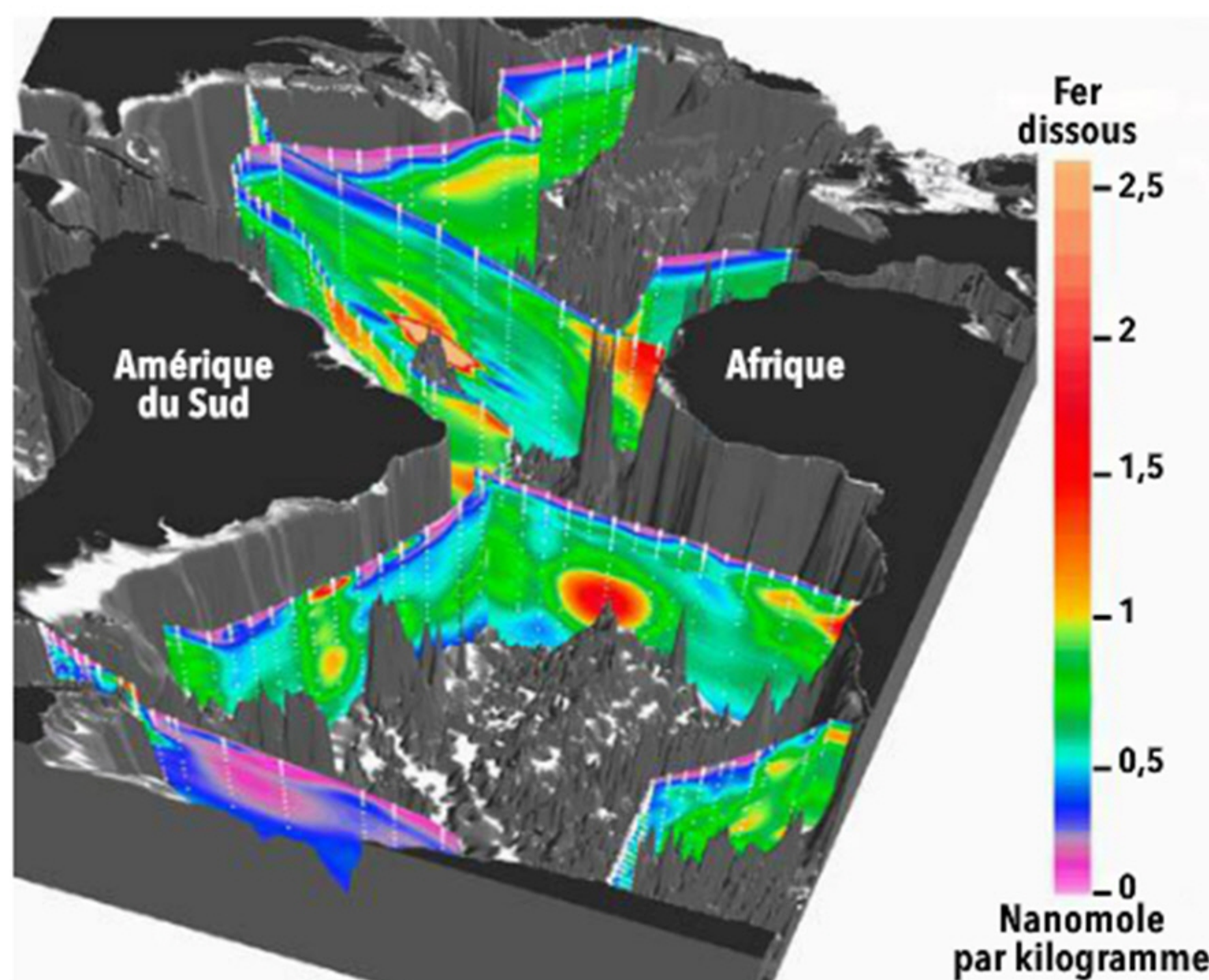
130 °C pour le polyéthylène, dont la température de fusion est plus basse. « Le nylon s'est ainsi contracté de 34 % et le polyéthylène de 16 % », détaille Philippe Poulin, de l'université de Bordeaux. Mieux : les deux matériaux ont retrouvé, en refroidissant, leur longueur initiale. « Ces propriétés sont dues notamment aux interactions fortes entre les chaînes de polymères qui composent le nylon et le polyéthylène », explique Philippe Poulin. Ultime avantage, le nylon et le polyéthylène sont des matériaux de consommation courante, peu onéreux. ■

**Vincent Glavieux**

[1] C. S. Haines et al., *Science*, 343, 868, 2014.

## Environnement

### Sur la trace des métaux dissous dans les océans



**ON CONNAÎT MIEUX** la concentration et la répartition des traces de fer (à gauche) et de plomb (à droite) dissous dans l'océan Atlantique, grâce aux mesures effectuées par le projet Geotraces et rassemblées sur ces cartes. Celles-ci mettent en évidence l'importance des dorsales océaniques comme sources de fer naturel dissous (zones rouges), alors que leur apport était jusqu'ici considéré comme négligeable. Pour le plomb, on remarque qu'il est surtout d'origine humaine : il est très présent en surface, par exemple le long des côtes américaines et nord-africaines. © COLLABORATION GEOTRACES



## → Bref

### → PSYCHIATRIE

#### Détecter Alzheimer

Un test sanguin pour détecter la maladie d'Alzheimer ? Une étude américaine montre que le niveau de concentration de dix lipides dans le sang permet de prédire avec une fiabilité de 90 % si cette personne développera des troubles de la mémoire ou la maladie d'Alzheimer dans les trois ans.

M. Mapstone et al., *Nature Medicine*, doi:10.1038/nm.3466, 2014.

### → ZOOLOGIE

#### Vers empilés

À l'aide d'une colle physiologique, le ver *Pristionchus pacificus* est capable de grimper sur ses congénères jusqu'à former une tour 30 fois plus haute que lui. Selon l'équipe allemande à l'origine de la découverte, ce stratagème permet au parasite d'intercepter au vol les coléoptères dont il se repaît.

S. Penkov et al., *Nature Chemical Biology*, 10, 281, 2014.

### → BIOLOGIE

#### Cellules souches imaginaires ?

L'article présentant la reprogrammation de cellules de souriceaux en cellules souches grâce à un bain acide semble frauduleux, comme *La Recherche* le laissait entendre le mois dernier. L'institut où ont été réalisés ces travaux parle d'« erreurs graves ». L'auteure principale aurait aussi plagié une partie de sa thèse.

D. Cyranoski, *Nature*, 507, 283, 2014.

## Climat

# En 2045, le réchauffement climatique dépassera 2 °C en Europe



**ROBERT VAUTARD** est directeur de recherche CNRS au laboratoire des sciences du climat et de l'environnement, à Gif-sur-Yvette.

**Pourquoi avez-vous modélisé le climat en Europe dans le cas où la température moyenne de la planète aurait augmenté de 2 °C par rapport à l'ère préindustrielle ?**

**R.V.** Cette hausse de 2 °C correspond au seuil que la communauté internationale s'est engagée à ne pas dépasser lors de la conférence de Cancun sur les changements climatiques, en 2010. C'est 1,5 °C de plus que la température moyenne de la fin du XX<sup>e</sup> siècle. Au-delà, il est admis que le réchauffement pourrait représenter un danger pour les sociétés. En partant d'un scénario moyen sur le changement climatique global, nous avons d'abord calculé que ce seuil sera atteint vers 2045. Puis nous avons modélisé le climat européen dans cette configuration en utilisant 15 modèles élaborés par des équipes du continent [1]. Ils s'appuient sur un découpage

de l'espace en mailles de 25 kilomètres de côté, ce qui permet une simulation assez fine.

**Comment se traduira ce réchauffement ?**

**R.V.** Il sera plus important que le réchauffement global, c'est-à-dire supérieur à 2 °C. Ce n'est pas étonnant, car on sait que les continents se réchauffent plus vite que les océans. Plus intéressant, notre étude révèle de forts contrastes géographiques en fonction des saisons. En hiver, l'est et le nord de l'Europe se réchaufferont davantage que le reste du continent, avec une hausse pouvant atteindre 3 °C par rapport au climat passé récent. Cela s'explique par la diminution de l'enneigement : lorsque le sol n'est pas couvert de neige, il absorbe davantage d'énergie solaire, ce qui fait augmenter la température. En été, le réchauffement sera au contraire plus important dans le sud de l'Europe, à cause de l'aggravation des sécheresses, amplifiées par le réchauffement climatique qui accroît l'évaporation des sols.

**Il pleuvra donc moins ?**

**R.V.** Là encore, cela dépend des régions et des saisons. Les précipitations vont en effet diminuer dans le centre et le sud de l'Europe en été, avec une baisse pouvant aller jusqu'à 20 %. Mais elles vont augmenter dans le centre et le nord de

l'Europe en hiver, et dans le nord de l'Europe en été. Par ailleurs, l'ensemble du continent connaîtra une hausse des précipitations intenses en toutes saisons, à l'exception de du sud en été. Le risque d'inondations sera par conséquent plus élevé.

**Les catastrophes climatiques vont-elles se multiplier ?**

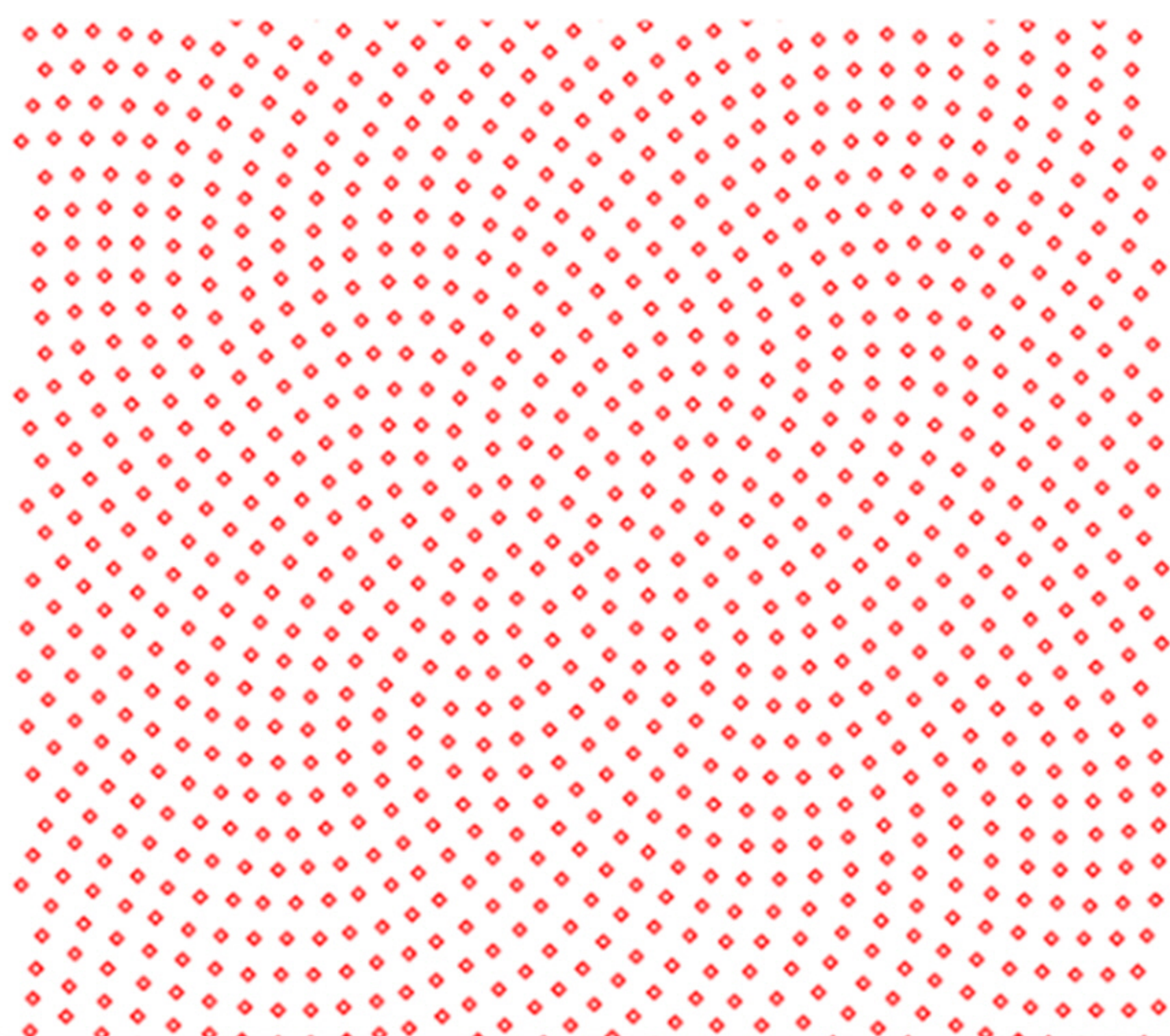
**R.V.** Outre les inondations, les épisodes de canicule devraient être plus fréquents et plus sévères. Nous avons calculé l'évolution des températures extrêmes, c'est-à-dire celles qui se produisent une fois tous les vingt ans en moyenne. Les températures minimales extrêmes en hiver connaîtront une forte hausse, jusqu'à 6 °C dans les pays scandinaves. Et les températures maximales extrêmes en été augmenteront dans toute l'Europe jusqu'à 4 °C. Tous les événements climatiques extrêmes ne vont toutefois pas s'aggraver. Ainsi, la force et la fréquence des tempêtes ne devraient pas augmenter. Cependant, notre étude montre que l'Europe devra faire face à des modifications importantes de son climat même dans le cas où le réchauffement global serait strictement limité à 2 °C. ■ **Propos recueillis par Jacques Abadie**

[1] R. Vautard et al., *Environ. Res. Lett.*, 9, 034006, 2014.



## Mathématiques Les graines du tournesol alignées dans l'espace

**P**renez une fleur de tournesol. Faites-la tourner autour de son centre : elle ne change presque pas d'apparence. Autrement dit, elle possède une symétrie par rotation. En se fondant notamment sur cette remarque, l'Allemand Helmut Vogel avait proposé en 1979 une formule permettant de produire des graphiques dont les points sont disposés comme les graines dans le cœur du tournesol. Roland Bacher, de l'université Joseph-Fourier à Grenoble, vient de proposer un cadre abstrait, mêlant géométrie hyperbolique et théorie des nombres, pour expliquer pourquoi ces graphiques font apparaître des grandeurs telles que le nombre d'or



**LA MEILLEURE RÉPARTITION DES GRAINES** dans le cœur d'un tournesol calculée à l'aide d'un modèle mathématique proposé en 1979 est obtenue lorsque l'un des paramètres de celui-ci est égal au nombre d'or. Une transformation dans l'espace hyperbolique explique pourquoi. © ROLAND BACHER/UNIVERSITÉ JOSEPH-FOURIER, GRENOBLE

$((1+\sqrt{5})/2)$  ou des éléments de la suite de Fibonacci (1,1,2,3,5,8... ; chaque terme étant la somme des deux

termes précédent) [1]. Le mathématicien a d'abord linéarisé les équations du modèle de Vogel,

ce qui revient à se placer loin du centre de la fleur. Ce faisant, il a obtenu une configuration qui est un réseau : elle est invariante par translation. Cela lui a permis d'utiliser des outils mathématiques élaborés pour étudier les réseaux. En particulier, pour étudier l'ensemble des réseaux possibles, les mathématiciens ont un cadre baptisé espace des modules des réseaux qui est représenté par un objet abstrait : la courbe modulaire (un objet étroitement lié à l'espace hyperbolique). Roland Bacher a alors établi une correspondance entre le réseau de la fleur de tournesol et l'espace des modules correspondant. Autrement dit, il y a une correspondance entre les points de l'espace

## Environnement L'acidification de l'océan trouble la vue des poissons

**C**haque année l'océan absorbe environ un quart du dioxyde de carbone émis dans l'atmosphère par les activités



**LE POISSON ACANTHOCROMIS POLYACANTHUS** réagit moins bien aux stimuli visuels lorsque l'acidité de l'eau de mer atteint la valeur attendue pour la fin du siècle. © R. DIRSCHERL/ARCO/BSIP

humaines. Ce faisant, il s'acidifie. D'après une étude australienne, l'augmentation d'acidité ainsi attendue pour la fin du siècle aurait des conséquences sur la vision de poissons-demoiselles, de l'espèce *Acanthochromis polyacanthus*, utilisée comme modèle [1].

Les biologistes ont placé des poissons dans de l'eau avec deux concentrations de dioxyde de carbone différentes : la concentration actuelle des océans et celle attendue pour la fin du siècle. Dans le second cas, la « fréquence de scintillement maximale de la rétine » a diminué après sept jours, indiquant une réduction de la capacité de la rétine à réagir à un stimulus visuel. Selon Jean-Pierre Gattuso, du CNRS, au laboratoire d'océanographie de

Villefranche-sur-Mer, « ces résultats suggèrent que, dans le futur, certains poissons auront une moindre capacité à réagir à des événements rapides, comme l'arrivée d'un prédateur ».

Les biologistes australiens ont aussi montré que ce phénomène provient d'une perturbation des « récepteurs GABAA », molécules intervenant dans la transmission de l'influx nerveux : les messages électriques véhiculés par les neurones sont transmis moins rapidement et moins efficacement. Cette dégradation de la vision complète la liste des effets de l'acidification des océans sur l'appareil sensoriel de poissons. Des conséquences néfastes sur l'audition et l'olfaction d'autres espèces ont déjà été montrées. ■ **Camille L'Épine**

[1] Wen-Sung Chung et al., *J. Exp. Biol.*, 217, 323, 2014.



# hyperbolique

physique (qui correspondent aux centres des graines de la fleur) et des points de l'espace des modules (l'espace hyperbolique abstrait) : à chaque point de l'espace réel correspond un point de l'espace des modules.

**Demi-cercle** Or, il a remarqué que dans cet espace abstrait, les points s'alignent : ils se trouvent tous sur un demi-cercle (une droite dans l'espace euclidien est un demi-cercle dans l'espace hyperbolique). On peut explicitement décrire ce demi-cercle qui se confond avec une géodésique, plus court chemin entre deux points de cet espace. Faisant varier les paramètres du modèle, il a ainsi montré que l'angle de rotation considéré comme optimal entre le centre de deux graines qui apparaissent successivement dans la fleur (137,5 degrés), correspondant au nombre d'or, donne dans l'espace hyperbolique la géodésique la plus courte de la courbe modulaire. Par la même approche, liée à la décomposition de nombres irrationnels en fraction continue – qui donne la meilleure approximation rationnelle de ces nombres – il explique aussi l'apparition des nombres de la suite de Fibonacci, ou d'autres caractéristiques observées. ■ **Philippe Pajot**

[1] <http://arxiv.org/abs/1301.7568>

## → Bref

### → CHIMIE

#### Pression colorante

Des chimistes chinois ont mis au point un gel aux capacités inédites : il passe vite du rouge au bleu (et inversement) quand on le déforme. La compression des sphères cristallines qui le composent altère les longueurs d'onde que celles-ci reflètent.

D. Yang et al., *Adv. Funct. Mat.*, doi: 10.1002/adfm.201303555, 2014.

### → PSYCHOLOGIE

#### Âge et stéréotype

À 5 ans, les enfants américains estiment que d'autres enfants ressentent pareillement une douleur, qu'ils soient Noirs ou Blancs. À 7 ans, ils pensent que les petits Noirs la ressentent un peu moins, et à 10 ans beaucoup moins. Les stéréotypes culturels seraient donc intégrés vers l'âge de raison.

R.A. Dore et al., *Bjdp*, doi: 10.1111/bjdp.12038, 2014.

### → BIOLOGIE

#### Virus géant

Un nouveau virus géant, d'un diamètre supérieur à 0,5 micromètre, baptisé *Pithovirus sibericum*, a été découvert dans une carotte de glace sibérienne après 30 000 ans de congélation. Il est inoffensif pour l'homme et les animaux, mais infecte les amibes, organismes unicellulaires.

M. Legendre et al., *PNAS*, doi: 10.1073/pnas.1320670111, 2014.



© JULIA BARTOLI & CHANTALABERGEL/IGS CNRS - AMU

Inserm



un lieu universcience



Une conférence citoyenne  
le jeudi 22 mai de 19h à 20h30

## Mémoire et oubli : un couple inséparable

Un duplex entre la Cité des sciences  
et de l'industrie à Paris  
et l'Université d'Aix-Marseille

La mémoire est liée à notre identité et notre histoire. En étudiant ses troubles comme les amnésies ou la maladie d'Alzheimer, la recherche scientifique décrypte sa structure et son fonctionnement, en grande partie inconnus. Pourquoi oublions-nous ? Le temps ou les maladies la condamnent-ils à s'effacer ? Comment vivre lorsqu'on oublie ?

Autant de questions autour desquelles débattront le public avec les interventions des :

■ **Pr Francis Eustache**, directeur d'études à l'EPHE, directeur de l'Unité de recherche U1077 à l'université de Caen / Basse-Normandie, directeur du GIP Cyceron

■ **Pr Patrick Lemaire**, professeur de psychologie à Aix-Marseille Université, Laboratoire de Psychologie cognitive, CNRS UMR 7290, et membre de l'Institut universitaire de France

■ Un intervenant d'association

Débat animé par Jean-Philippe Braly, journaliste pour le magazine *La Recherche*.



Pour voir et revoir la conférence  
et pour en savoir plus : [dircom.inserm.fr](http://dircom.inserm.fr)

## Partenaires

Recherche

docteur

casden

MAIRIE DE PARIS

Gulliver  
gullivcrasso.org

Aix-Marseille  
université

culture science

Région  
Provence  
Alpes  
Côte d'Azur



## Cognition Certaines personnes sont spécifiquement insensibles à la musique

**N**e ressentir aucun plaisir en réaction à un stimulus censé en apporter – nourriture, boisson, etc., cela s'appelle l'anhédonie. On considérait jusqu'à présent que cet état était dû à un dérèglement du système cérébral de la récompense, et donc indépendant du type de stimulus.

« Or, pour la première fois, l'équipe de Robert Zatorre, à l'université McGill de Montréal, au Canada, vient d'identifier l'existence d'une anhédonie spécifique à la musique », souligne Hervé Platel, de l'université de Caen [1]. L'équipe a soumis deux

groupes de personnes à plusieurs tests. Tous les participants avaient une compréhension intellectuelle des émotions musicales : ils identifiaient quatre émotions (joie, tristesse, peur, paix) véhiculées par une mélodie.

Mais les individus du premier groupe ont noté qu'ils ne ressentait aucun plaisir à l'écoute d'une mélodie, contrairement aux membres du second groupe. Et ces affirmations ont été confirmées par des mesures physiologiques (rythme cardiaque, conduction cutanée) indiquant une absence de réaction.

Cependant tous les participants ont noté qu'ils ressentaient du plaisir en réaction à d'autres stimuli plus primaires, argent, sexe, nourriture. Et ils ont tous obtenu les mêmes résultats à un test permettant d'évaluer le plaisir apporté par un gain d'argent.

Les individus du premier groupe sont donc bien atteints d'une anhédonie spécifiquement musicale. Comment l'expliquer ?

Selon les auteurs, le système cérébral activant le plaisir musical serait différent de celui lié à des stimuli plus primaires. ■

Marie-Laure Théodure

[1] E. Mas-Herrero et al., *Current Biology*, 24, 1, 2014.

## Géophysique La plus ancienne roche terrestre a bien 4,374 milliards d'années

**Q**uand les conditions nécessaires à l'apparition de la vie sur Terre ont-elles été réunies ? Il y a 4,374 milliards d'années, soit moins de 200 millions d'années après la formation de notre planète, confirme une étude de l'équipe de John Valley, de l'université du Wisconsin, aux États-Unis [1]. Ce chiffre avait déjà été avancé en 2001 lors de la datation de cristaux de zircon, minéral qui garde la trace de son histoire, découverts sur le site de Jack Hills en Australie.

Mais il faisait depuis l'objet de controverses. Le zircon se trouve dans des roches issues de la plus ancienne croûte terrestre : celle-ci s'est formée au moment où l'eau, nécessaire à la vie, est apparue sur Terre et a refroidi les roches magmatiques en fusion.

En 2001, les cristaux de zircon de Jack Hills avaient été datés grâce à une méthode fondée sur la désintégration radioactive naturelle de l'uranium en plomb. Mais cette méthode n'est fiable que si aucun atome de plomb ne s'est échappé du

minéral. Or la désintégration naturelle radioactive aurait pu provoquer la diffusion d'atomes de plomb. L'équipe de John Valley a éliminé cette éventualité en utilisant une méthode nommée « tomographie atomique ». Elle permet de cartographier avec une résolution de 0,3 nanomètre la distribution des atomes de plomb dans le cristal de zircon. Résultat : cette distribution a été très peu perturbée au cours du temps, ce qui confirme l'exactitude de la datation. ■ M.-L. T.

[1] J. Valley et al., *Nature geoscience*, doi :10.1038/NGEO2075, 2014.

## → Bref

### → ÉTHOLOGIE

#### Chimpanzés empathiques

Les chimpanzés savent témoigner de l'empathie envers d'autres chimpanzés, envers des êtres humains proches ou inconnus, mais pas envers une espèce non familière, les singes-lions. Un résultat obtenu en observant s'ils se mettent à imiter différents individus lorsqu'ils les voient bâiller.

M. W. Campbell et al., *Proc. R. Soc. B.*, 281, 20140013, 2014.

### → ÉDUCATION

#### SMS et orthographe

Une équipe française a recueilli tous les mois durant un an les SMS envoyés par dix-neuf adolescents âgés de 12 ans. Sur cette base, couplée à des tests d'orthographe, ils ont montré que l'envoi intensif de SMS en écriture abrégée ne dégrade pas la qualité de l'orthographe.

J. Bernicot et al., *Journal of Computer Assisted Learning*, doi:10.1111/jcal.12064, 2014.

### → ASTRONOMIE

#### Étoile double serrée

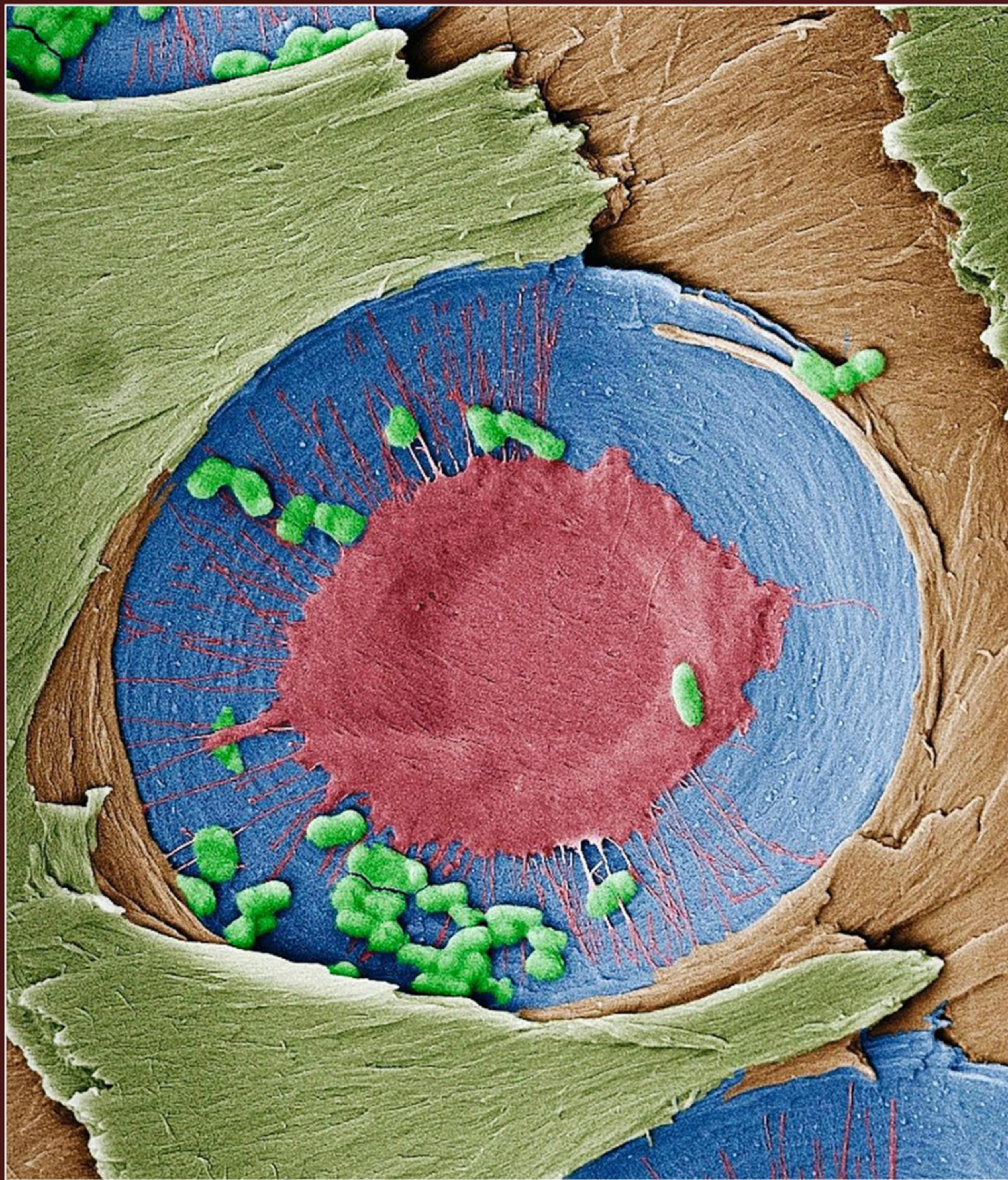
L'étoile jaune HR5171 (au centre de l'image), dont le rayon vaut 1 300 fois celui du Soleil, forme un étrange système double avec un partenaire plus petit, selon des observations réalisées avec le Very Large Telescope européen, au Chili. Ce partenaire est en effet en contact direct avec l'étoile principale.

O. Chesneau et al., *Astronomy & Astrophysics*, 563, A71, 2014.



©ESO/DIGITIZED SKY SURVEY 2





## Biologie Une membrane de filtration extraite d'un arbre

**C**e disque bleu (au centre) pourrait faciliter l'accès à l'eau potable dans les pays en développement. Il s'agit d'une « ponctuation » dans une membrane extraite d'une branche de pin par une équipe du MIT, aux États-Unis. Elle a la propriété de filtrer l'eau à travers des pores de quelques nanomètres retenant

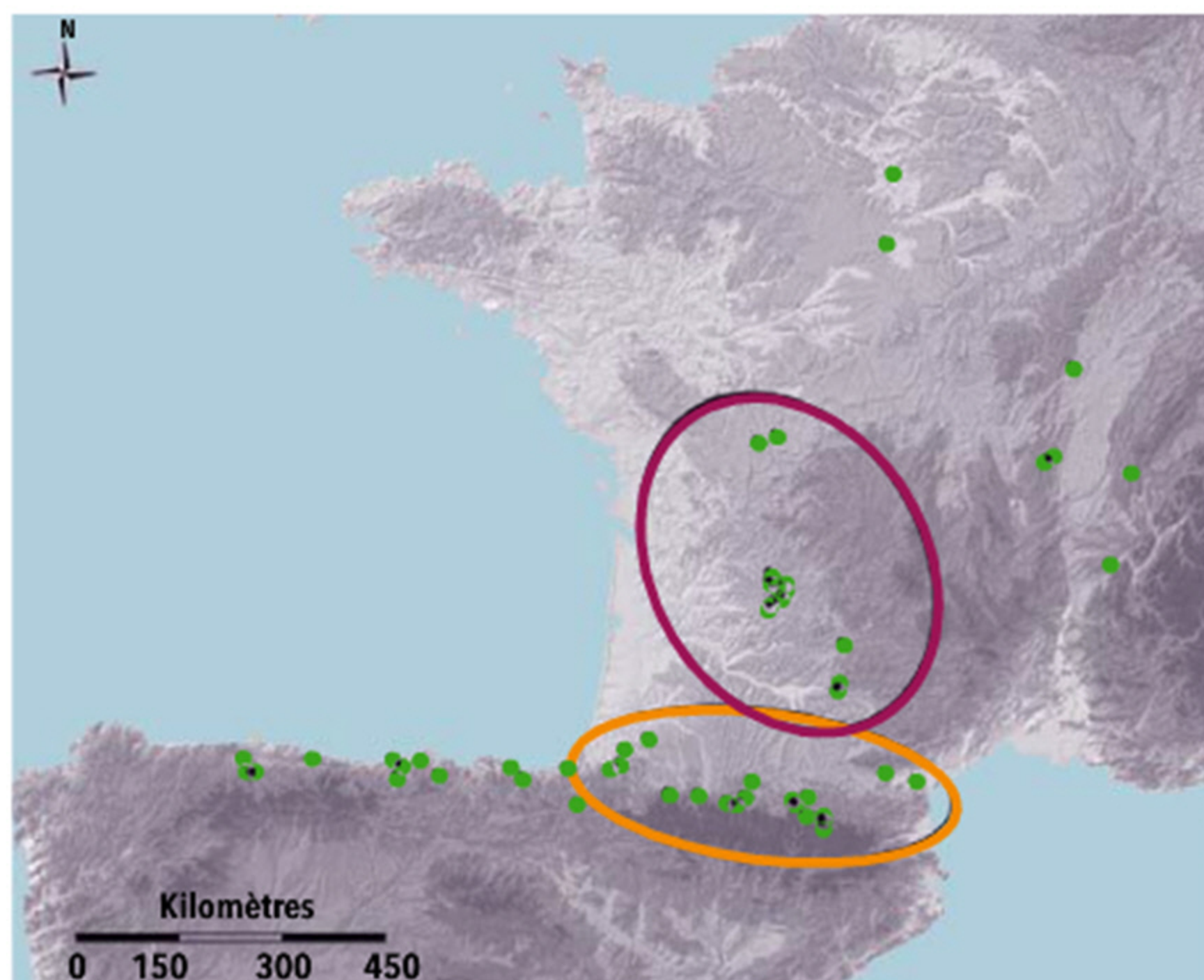
les micro-organismes (en vert). Un seul centimètre carré de cette membrane, répandue dans le règne végétal, suffirait à purifier 4 litres d'eau par jour, soit les besoins quotidiens d'un individu [1]. L'image, agrandie 3 500 fois, est en fausses couleurs.

[1] M. S. H. Boutilier et al., *PLoS ONE*, 9(2), e89934, 2014.



## Préhistoire L'art du Magdalénien a évolué dans le temps et dans l'espace

**I**l y a entre 14 000 et 12 000 ans, les groupes humains qui occupaient l'ouest de l'Europe développaient ce que l'on nomme la culture magdalénienne. Mais celle-ci n'était sans doute pas si homogène que le pensaient les préhistoriens qui ont créé cette classification. Ainsi, l'étude de têtes de chevaux gravées sur des os tout au long de ces 2 000 ans révèle des variations temporelles et géographiques dans le style et donc, probablement, dans la signification de ces représentations. Olivia Rivero et Georges Sauvet, de l'université de Toulouse-III, ont examiné 273 de ces sculptures, issues de 57 sites archéologiques.



**D'APRÈS LES VESTIGES DE 57 SITES**, les gravures de têtes de cheval magdaléniennes réalisées il y a 14 000 ans dans les Pyrénées (cercle orange) diffèrent de celles d'il y a 12 000 ans exécutées en Aquitaine (cercle violet). © SOURCE : D'APRÈS *ANTIQUITY PUBLICATIONS* 88 (2014) : 64-88

Ils ont recensé, pour chacune, la présence ou l'absence de dix-sept caractéristiques : la forme

des yeux, la présence d'une bouche ou d'oreilles, l'utilisation de hachures pour les contours ou

pour la crinière, etc. Puis, à l'aide d'une analyse statistique, ils ont distingué trois groupes. Le premier rassemble des sculptures produites il y a environ 14 000 ans, principalement dans les Pyrénées centrales. Elles sont caractérisées par la présence de détails anatomiques et de hachures. Le second rassemble des objets fabriqués il y a 12 000 ans environ, en Aquitaine. Les chevaux y ont une importante crinière. Le troisième, enfin, qui ne se rattache ni à une région ni à une époque particulière, contient des sculptures sur lesquelles les organes sensoriels ne sont pas représentés. ■ Rémi Canali

[1] O. Rivero et G. Sauvet, *Antiquity*, 88, 64, 2014.

## Technologie Une membrane artificielle pour surveiller le cœur

**I**maginez être renseigné en permanence sur le rythme de votre cœur, son acidité ou encore sa température. Imaginez que l'on puisse répondre immédiatement à un trouble de son activité, par un choc électrique ou par l'injection d'un médicament. Une équipe amé-

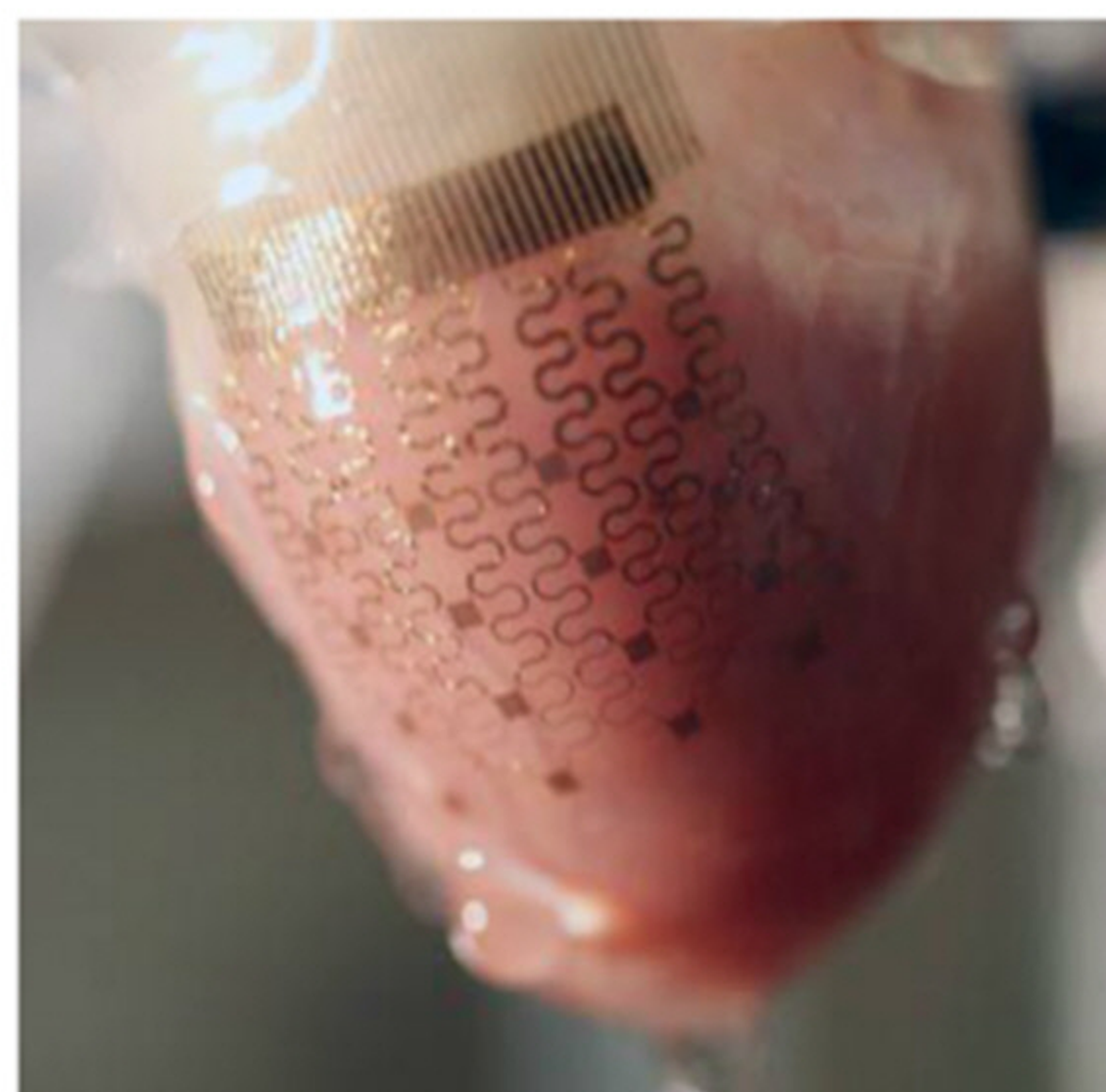
ricaine a fabriqué une membrane élastique bardée de capteurs qui réalisera sans doute bientôt toutes ces fonctions [1].

Les chercheurs ont d'abord élaboré la réplique d'un cœur de lapin avec une imprimante 3D, après avoir numérisé ce dernier en trois dimensions. Puis

ils ont apposé à sa surface des micro-composants électronique. Enfin, ils ont projeté du silicone sur l'ensemble, afin de fabriquer une membrane (baptisée « 3D-MIM ») qui inclut ces micro-composants et qui s'adapte à la forme et aux mouvements de l'organe originel.

Une fois la membrane greffée sur le cœur encore battant de l'animal, les capteurs ont mesuré un large éventail de variables physiologiques en différents points. À court terme, ces données locales permettront surtout aux chercheurs de mieux appréhender les troubles du rythme cardiaque. Cependant des applications thérapeutiques se profilent déjà : la 3D-MIM pourrait par exemple aider les chirurgiens à détecter l'origine d'une anomalie lors d'une opération à cœur ouvert. Mais il faudra attendre encore quelques années avant que cette technologie n'accompagne les patients dans leur vie quotidienne : d'ici là l'autonomie énergétique et le contrôle à distance devront notamment être améliorés. ■ Pierre Martin

[1] L. Xu et al., *Nature communications*, 5, 3329, 2013.



**UNE MEMBRANE ARTIFICIELLE** est appliquée sur un cœur de lapin perfusé avec un liquide d'une composition proche de celle du sang. Les capteurs enregistrent ici la variation de la température suite à l'injection d'une solution froide.

© UNIVERSITY OF ILLINOIS & WASHINGTON UNIVERSITY



## → Bref

### → COGNITION

#### Mémoire musicale

Les musiciens se rappellent mieux une nouvelle mélodie s'ils l'ont jouée plusieurs fois que s'ils l'ont seulement écoutée plusieurs fois. Ce rôle fondamental du cortex cérébral moteur dans la mémoire musicale a été mis en évidence auprès d'un groupe de 20 pianistes confirmés.

B. Mathias et al., *Cerebral Cortex*, doi:10.1093/cercor/bhu030, 2014.

### → VERBATIM

« Faut d'un choix politique affirmé, la capacité de la France à effectuer des recherches de haut niveau va continuer à reculer. »

Conseil scientifique du CNRS, à l'issue de son mandat (2011-2014).

### → PALÉONTOLOGIE

#### Cimetière marin

L'analyse des ossements de mammifères marins de 6 à 9 millions d'années retrouvés en nombre au même endroit dans le désert côtier d'Atacama, au Chili, indique que ces animaux seraient morts en mer intoxiqués par des algues. Leurs corps auraient ensuite été emportés par les courants, avant de s'échouer.

D. Pyenson et al., *Royal Society Journal*, 281, 1781, 2014.

#### Indicateur

# 50 %

des parents européens ayant un enfant obèse sont aveugles à son état. 40 % d'entre eux craignent même qu'il soit en sous-poids (73 % en Italie, 1 % seulement en Suède).

Susann Regber, <http://bit.ly/IDEFICSRegber>

## Web du mois Les premiers Parisiens



## Astronomie Des nuages observés à la surface d'une naine brune

**D**es nuages « parfois plus gros que la Terre » se formeraient dans l'atmosphère d'une naine brune, Luhman 16B, située à 6,5 années-lumière de la Terre. C'est le constat de l'équipe de Ian Crossfield, de l'institut Max Planck de Heidelberg, en Allemagne, qui pour la première fois a observé la « météorologie » de ce type d'objet [1]. Ni étoiles, ni planètes, les naines brunes sont des objets bloqués à un stade hybride, la combustion d'hydrogène nécessaire à la formation d'une étoile n'ayant pas eu lieu. Grâce à sa proximité avec la Terre, Luhman 16B est un laboratoire privilégié pour l'étude de ces corps céles-

tes qui n'existent pas dans notre système solaire. Les astronomes ont étudié son atmosphère avec le système Cires, spectromètre à haute résolution installé sur le Very Large Telescope, au Chili. Il peut scruter les objets à très faible luminosité. C'est le cas des naines brunes qui brillent dans le domaine infrarouge. La proximité de l'astre permet aussi d'utiliser une technique de mesure nommée « tomographie Doppler ». « C'est la première fois que cette méthode est appliquée à des objets si peu brillants », apprécie Jean-François Donati, de l'Observatoire Midi-Pyrénées. L'analyse a permis de déceler des taches sombres sur la surface

de Luhman 16B, que les scientifiques de l'institut Max Planck interprètent comme d'énormes nuages entraînant des variations de luminosité. L'objet accompli une rotation en 4,9 heures. Cette vitesse élevée a permis de mettre en évidence une évolution rapide de la météorologie. Des instruments à infrarouge plus performants sont en construction. « Ils permettront de faire ces observations de manière routinière, espère Jean-François Donati. Un examen plus long permettrait de dresser une étude comparative des phénomènes météorologiques sur plusieurs rotations. » ■

Florian Royer

[1] I. J. M. Crossfield et al., *Nature*, 505, 654, 2014



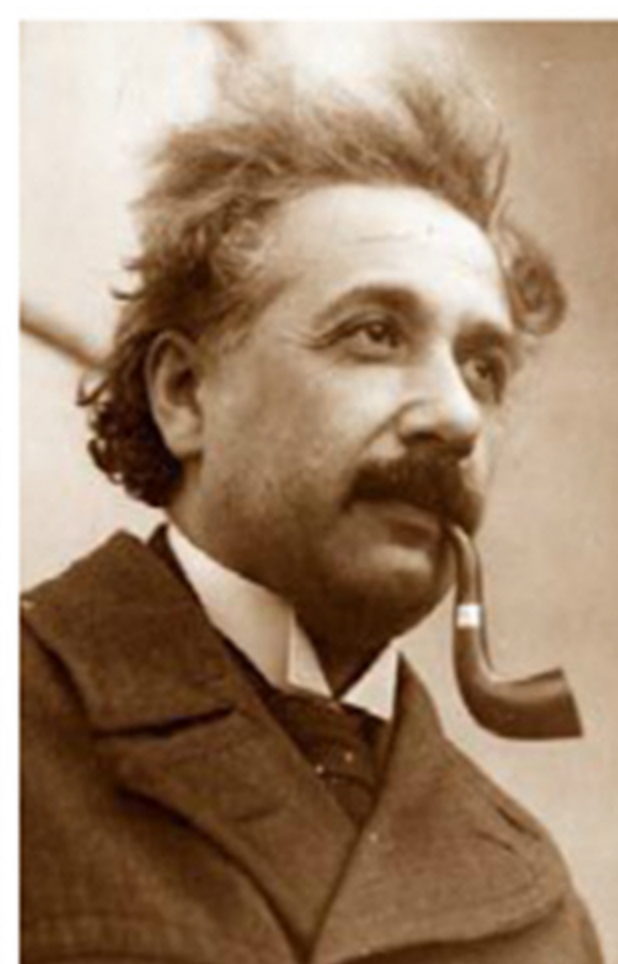
## Physique Einstein a étudié l'idée d'un Univers stationnaire

**L**a chance a souri à un groupe de physiciens de l'institut de technologie de Waterford, en Irlande. Cormac O'Raiartaigh et ses collègues effectuaient des recherches dans les archives numériques des manuscrits d'Albert Einstein, disponibles en ligne, quand ils ont découvert un brouillon de 1931, jamais publié, où Einstein expose une théorie de l'Univers qui va à l'encontre de ce qu'il défendait jusqu'alors [1].

En 1917, Einstein avait présenté un modèle d'Univers homogène et statique, qui n'avait

ni commencement ni fin. « Ce modèle, qui était corroboré par les observations de l'époque, tenait chez lui de la conviction quasi philosophique », explique Cormac O'Raiartaigh. À tel point, d'ailleurs, qu'il n'hésita pas à ajouter un terme, baptisé « constante cosmologique », à ses équations de la relativité générale, énoncées deux ans plus tôt, pour que celle-ci s'accommode d'un tel Univers.

Mais, au début des années 1930, cette position était devenue intenable. Deux théoriciens, le Russe Alexander Friedmann, en 1922, et le Belge Georges Lemaître, en 1927,



© KEYSTONE-FRANCE / GAMMA-RAPHO

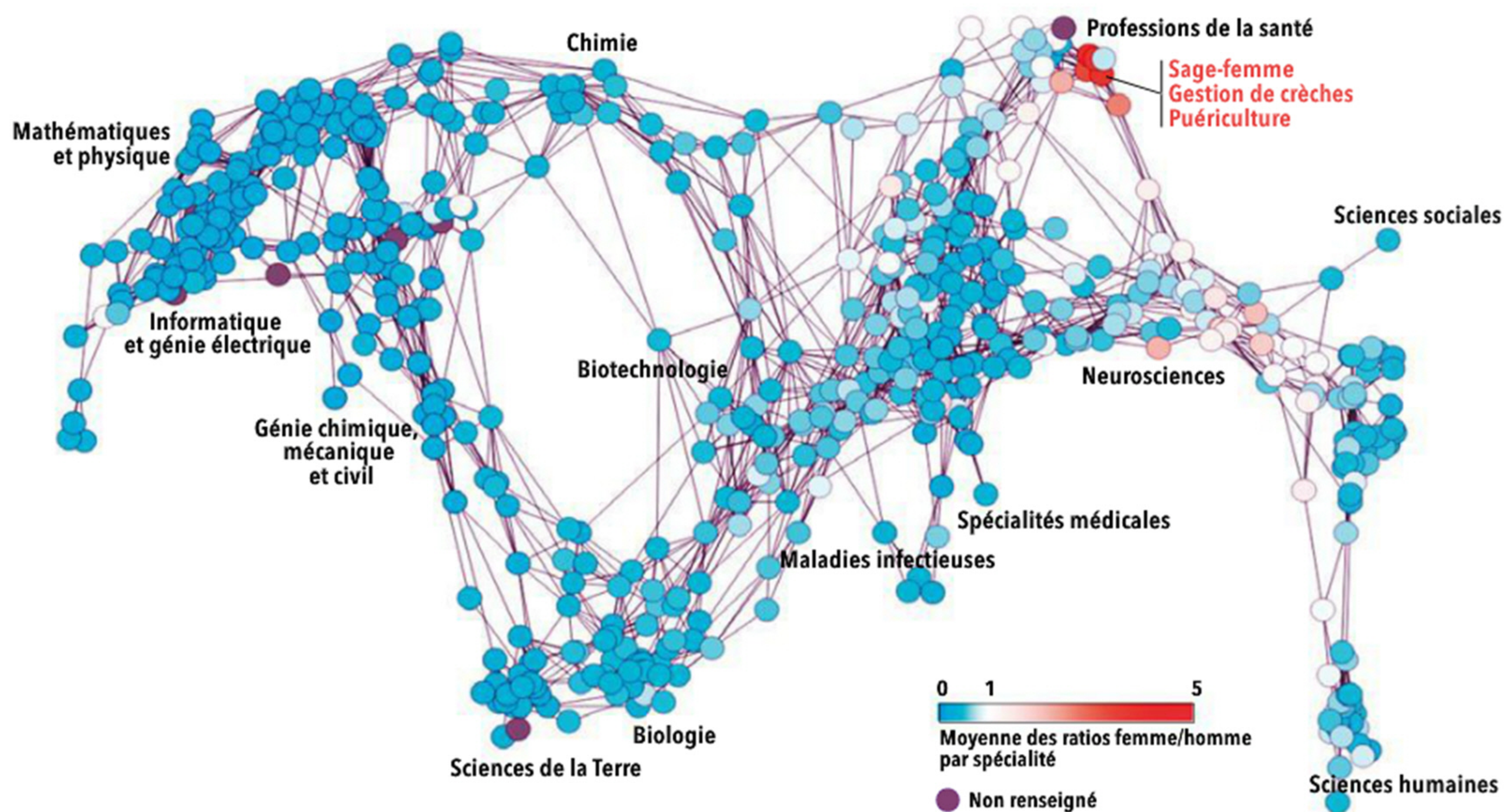
avaient en effet indépendamment montré que, dans le cadre de la relativité générale, l'Univers est en expansion. Il doit en outre être issu d'une singularité initiale et sa densité de matière diminue au fur et à mesure de son expansion.

### Chronologie

- > **1915 Einstein** : théorie de la relativité générale.
- > **1917 Einstein** : constante cosmologique et Univers statique.
- > **1922 Friedmann** : la relativité générale implique que l'Univers est en expansion et que sa densité décroît au fil du temps.
- > **1927 Lemaître** : trouve indépendamment la même conclusion que Friedmann.
- > **1929 Hubble** : observe l'Univers en expansion.
- > **1931 Einstein** : explore l'idée d'un Univers en expansion de densité constante.

Ces prédictions théoriques avaient été confirmées en partie par les observations de l'astronome américain Edwin Hubble, en 1929. Le manuscrit retrouvé « représente donc la première réaction d'Einstein aux preuves de l'expansion de l'Univers apportées par Hubble ».

## Sociologie Les femmes signent trop peu d'articles scientifiques



LA PARTICIPATION DES HOMMES ET DES FEMMES aux activités de recherche scientifique est présentée ici dans 554 spécialités (ronds de couleur) en faisant la moyenne des rapports entre le nombre de femmes et celui d'hommes auteurs d'un article scientifique. La cartographie est réalisée à partir de 5,5 millions d'articles indexés dans la base de données Web of Science de Thomson Reuters de 2008 à 2012. Les spécialités sont regroupées en 13 disciplines. Cette classification a été établie par une équipe de l'université de Californie, à San Diego. On constate que les femmes sont sous-représentées, hormis dans quelques spécialités liées à la santé. Source : Global Gender Disparities in Science, V. Larivière et al., <http://info.ils.indiana.edu/gender>



explique Cormac O'Raifeartaigh. Et il marque un tournant dans les convictions d'Einstein sur l'Univers. « Il essaye de construire un modèle cosmique que l'on connaît aujourd'hui sous le nom d'Univers stationnaire, détaille encore le physicien. Il s'agit d'un modèle où l'Univers est en expansion, mais où sa densité reste inchangée au cours du temps, car il produit de la matière en continu à partir du vide. » Dans les équations de ce modèle, Einstein conserve un terme qui fait office de constante cosmologique, mais qu'il associe à la création de matière à partir du vide.

**Erreur de calcul.** Sauf qu'Einstein n'a jamais publié le manuscrit. Et pour cause : d'après les physiciens irlandais, « il s'est rendu compte à la relecture qu'il contient une erreur de calcul, qui conduit à un Univers vide, sans matière. »

« Ce n'est pas la seule fois où il commet une erreur de calcul, il en a même fait de plus grosses dans sa carrière, observe Jean Eisenstaedt, de l'Observatoire de Paris. Ce document illustre l'évolution de la pensée d'Einstein sur l'Univers et préfigure le débat qui opposera les partisans du Big Bang et ceux de l'Univers stationnaire plus de quinze ans après. » ■

Vincent Glavieux

[1] C. O'Raifeartaigh et al., arXiv:1402.0132, 2014.

## → Bref

### → ARCHÉOLOGIE

#### Le plus vieux fromage

Des archéologues ont retrouvé du fromage, datant d'environ 3 500 ans, autour du cou d'une momie dans une tombe de l'âge du bronze à Xiaohu, en Chine. On pense que des fromages ont été fabriqués dès le VI<sup>e</sup> millénaire avant J.-C. en Europe mais c'est la première fois que l'on en retrouve d'aussi ancien.

Y. Yang et al., *J. Arch. Sci.*, 45, 178, 2014.

### → VERBATIM

« Votre réservation : M. Pesquet, l'@esa a le plaisir de confirmer votre décollage en 2016 vers l'ISS. Nous vous souhaitons un très agréable voyage »

Thomas Pesquet (@Thom\_astro), spationaute européen, sur Twitter le 17 mars 2014.

### → ENVIRONNEMENT

#### Accès à l'eau

L'Organisation des Nations unies (ONU) vient de publier la 5<sup>e</sup> édition de son rapport mondial sur la mise en valeur des ressources en eau. On retiendra qu'environ 780 millions de personnes dans le monde n'ont toujours pas d'accès à l'eau potable, chiffre stable par rapport à 2012, année de publication du précédent rapport.

[http://bit.ly/Unesco\\_WWDR2104](http://bit.ly/Unesco_WWDR2104)



en association avec **La Recherche**

## Les Rencontres Scientifiques Colas

Conférence-débat  
le mardi 20 mai 2014 à 18h00

animée par un journaliste  
de La Recherche

### « Le boom de l'impression 3D »

avec

#### Clément MOREAU

Directeur général et cofondateur de Sculpteo  
(Société de fabrication d'objets par impression 3D pour particuliers et professionnels)

et

#### Georges TAILLANDIER

Président de l'AFPR  
(Association française de prototypage rapide et de fabrication additive)

« L'impression 3D a le potentiel de révolutionner la façon dont nous fabriquons à peu près tout ». Ces mots sont ceux du président américain Barack Obama en personne. Des propos qui reflètent un engouement mondial pour cette technique permettant de créer des objets en trois dimensions avec une imprimante dite « 3D ». Mais comment fonctionnent concrètement ces imprimantes ? Et d'abord s'agit-il d'imprimer et d'imprimantes ? Quels types d'objets peuvent-elles réellement fabriquer, et pour qui ? Quels sont les enjeux économiques et juridiques sous-jacents ?

Inscription obligatoire avant le 12 mai 2014 :  
[rencontres-scientifiques@colas.fr](mailto:rencontres-scientifiques@colas.fr)

Lieu : Campus Scientifique et Technique Colas  
4, rue Jean Mermoz  
78114 Magny-les-Hameaux

Une navette sera à votre disposition à 17h00  
au départ du Siège de Colas - 7, place René Clair  
92100 Boulogne-Billancourt - M° Porte de St-Cloud  
(navette stationnée avenue Félix d'Hérelle)



## ASTRONOMIE

### Un astéroïde se disloque sous les yeux d'Hubble

**L**e télescope Hubble a observé à l'automne dernier un phénomène encore jamais vu « en direct » dans l'espace : la dislocation d'un astéroïde. Les premières analyses viennent de révéler la dynamique de l'événement, et interrogent déjà sur la composition de ce corps [1].

Hubble a repéré l'astéroïde P/2013 R3 en octobre, alors qu'il était déjà séparé en trois morceaux. En décembre, on comptait au moins dix fragments, dont le plus gros mesurait environ 200 mètres de diamètre. En étudiant leur vitesse, les astronomes ont confirmé que c'est la force centrifuge due à la rotation de l'objet sur lui-même qui est à l'origine de la dislocation. Il n'était pas assez solide pour y résister. D'après leurs estimations, le proces-

sus aurait commencé entre février et septembre 2013. Par ailleurs, cet astéroïde est suivi d'une traînée de poussières, et les analyses spectroscopiques ont révélé qu'il contient de l'eau. Ce qui le fait fort ressembler à une comète.

Des observations qui arrivent à point nommé. « Les scientifiques se posent effectivement beaucoup de questions en ce moment sur les différences qui existent entre comètes et astéroïdes », explique Daniel Hestroffer, de l'Observatoire de Paris. Les premières sont censées être des boules de glace, et les seconds des amas rocheux. Mais ce n'est peut-être pas si simple, et les astronomes continuent d'étudier les données relevées sur l'intérieur fraîchement exposé de P/2013 R3. ■

Rémi Canali

[1] D. Jewitt et al., *ApJ*, 714, L8, 2014.

29 octobre 2013

15 novembre 2013

13 décembre 2013

14 janvier 2014

**HUBBLE A OBSERVÉ** et photographié un astéroïde séparé en trois morceaux en octobre 2013. Après deux mois et demi, il s'était disloqué en dix fragments, sous l'effet de la force centrifuge due à sa rotation sur lui-même.

© NASA, ESA & D. JEWITT (UNIV. OF CALIFORNIA, LOS ANGELES)

## Technologie

### Les « Google Glass » dépistent des maladies

**Q**uelques gouttes de sang sur un kit de dépistage de la dengue ou du VIH... La scène tend à se banaliser, tant le diagnostic rapide a le vent en poupe. Les technologies mobiles aussi, à l'image des Google Glass, lunettes « intelligentes » développées par le géant américain d'Internet.

Une équipe de médecins et d'ingénieurs a justement eu l'idée d'associer les deux inventions. Résultat : un programme informatique qui, en quelques secondes et à partir d'une simple photographie, donne automatiquement le résultat d'un test biologique [1]. L'interface des lunettes aide à positionner

la fenêtre de lecture de ce dernier devant une caméra incrustée dans la monture. Un cliché est alors pris, puis envoyé, via Internet, à un serveur où il est décrypté. Là où l'œil profane ne voit qu'une bande colorée ou de vagues nuances, la machine extrait des données graphiques qu'elle traite par des tests statistiques. Enfin,

la date de l'analyse et son résultat sont envoyés à l'écran placé dans le coin droit des Google Glass. Sur plusieurs centaines d'essais à des concentrations variables de réactif, le logiciel n'a pas fait d'erreur. Ainsi, il est d'ores et déjà fonctionnel pour des tests détectant la présence d'anti-

corps du VIH dans le sang ou mesurant sa concentration en PSA, protéine indicatrice du cancer de la prostate. Pourra-t-on pour autant se passer d'une expertise médicale humaine ? Les Google Glass ne proposent pas encore d'accompagnement psychologique des malades. ■ Pierre Martin

[1] S. Feng et al., *ACS Nano*, 10.1021/nn500614k, 2014.



## L'Europe et les États-Unis vont s'associer pour explorer le cerveau

Européens et Américains se lancent dans l'une des plus importantes coopérations scientifiques de ce début du siècle.

**L**a communauté internationale avait coopéré pour déchiffrer le génome humain, au début des années 2000. Elle se mobilise pour un nouveau projet de très grande envergure, celui de l'exploration du cerveau. En Europe et aux États-Unis, les scientifiques du Human Brain Project (Projet cerveau humain) et du Brain Research through Advancing Innovative Neurotechnologies (Brain Initiative) travailleront ensemble dès cette année, ont annoncé des officiels du gouvernement américain et de la Commission européenne.

D'un côté, Brain Initiative lancé il y a un an par le président Barack Obama, doté de 100 millions de dollars de fonds fédéraux avec appel aux financements privés. Les plus importants organismes américains (la Darpa, les NIH, la FDA, la National Science Foundation) solliciteront et soutiendront des projets scientifiques et technologiques innovants pour comprendre les fonctions du cerveau et leurs relations avec les comportements humains. De l'autre, l'Human Brain Project, lauréat du programme européen FET Flagship, qui a reçu une



**BARACK OBAMA** annonçait le 2 avril 2013 le lancement de Brain Initiative, un programme de recherche sur le cerveau doté d'un budget de 100 millions de dollars. © AFP

subvention de 1,19 milliard d'euros sur dix ans. Coordonné par Henry Markram à l'École polytechnique fédérale de Lausanne, l'Human Brain Project veut simuler par ordinateur un cerveau humain complet. Deux ambitions complémentaires : si les Américains créent les outils d'exploration du cerveau, ils pourront les tester sur l'organe virtuel des Européens.

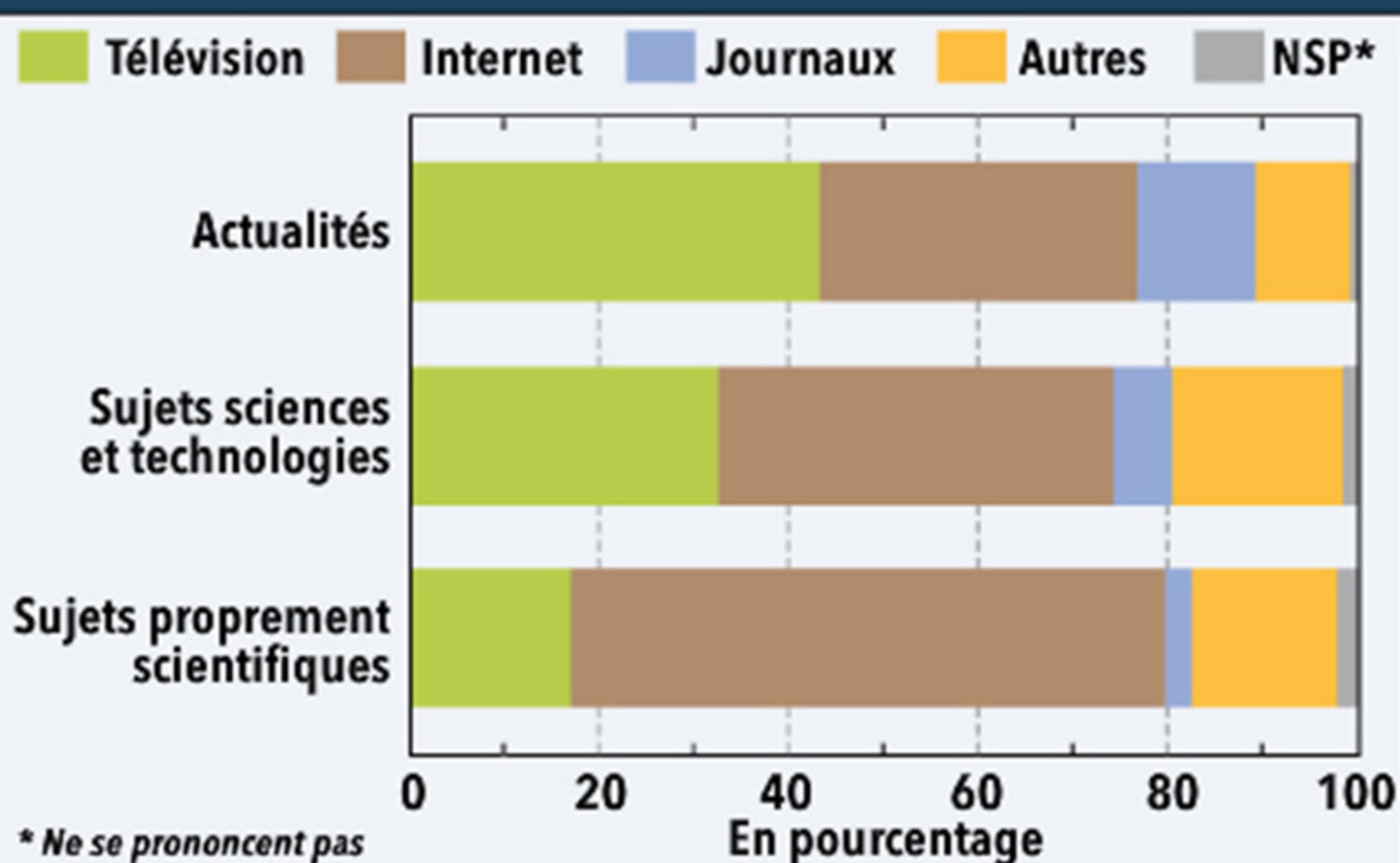
Les modalités de la coopération ne sont pas encore établies précisément. Mais l'échange de données entre les deux groupes a déjà débuté, de façon informelle. ■ **Aline Richard**

### → MÉDIAS

## L'information scientifique passe par Internet

Aux États-Unis, s'informer sur les sciences et les technologies passe en majorité par Internet. Un sondage annuel de l'université de Chicago souligne que, depuis 2001 au moins, les sondés se tournent vers le Web quand ils recherchent une information scientifique particulière (par exemple sur le boson de Higgs). En 2012, ils étaient 63 %. 17 % regardaient la télévision et seulement 3 % lisaient des journaux. Cependant, un bon nombre des utilisateurs du Web consultent les éditions en ligne de ces mêmes journaux pour leur information scientifique et technologique. Source : Université de Chicago, étude réalisée en 2012.

### COMMENT S'INFORMENT LES AMÉRICAINS



### → RÉSEAUX

## Wikipedia gratuit en Afrique et en Asie

La fondation Wikimedia a convaincu 26 opérateurs de téléphonie mobile de ne pas faire payer des utilisateurs d'Internet sur mobile qui consulteraient Wikipedia. L'initiative, «Wikipedia zéro», concerne 23 pays africains et asiatiques et 300 millions d'utilisateurs. La fondation investira cette année l'Amérique Latine.

### → SANTÉ PUBLIQUE

## L'OMS contre la pollution de l'air

L'Organisation mondiale de la santé présentera d'ici à la fin de l'année des recommandations de qualité de l'air pour les dispositifs de combustion à domicile (poêle à bois et charbon) qui polluent l'air des maisons dans nombre de pays pauvres. Globalement, l'air pollué a tué 7 millions de personnes dans le monde en 2012, ce qui en fait le premier facteur de risque environnemental pour la santé.



# T-Rex : enquête sur la star des dinosaures

■ Dossier préparé  
par Luc Allemand  
et Cécile Klingler

**V**ivant à la fin du Crétacé, juste avant la disparition quasi totale des dinosaures, *Tyrannosaurus rex*, plus gros prédateur carnivore que la Terre ait porté, n'aurait pas dû se trouver dans le parc jurassique de Steven Spielberg. Mais sa notoriété auprès du grand public, inaltérée depuis la découverte du premier spécimen

au début du XX<sup>e</sup> siècle, l'imposait. Conséquence inattendue, il est redevenu

un objet d'étude prisé des paléontologues.

Et, les fossiles et les études se multipliant, la compréhension de son évolution et de sa physiologie sont aujourd'hui des sujets scientifiques majeurs.

**1 Pourquoi c'est le dinosaure le plus étudié** par Jean Le Lœuff

**2 Une histoire de famille enfin démêlée** par Thomas Holtz

**3 Ce qui reste à découvrir sur T-rex** par Jean Le Lœuff

**4 Les dinosaures avaient le sang chaud** par Romain Amiot





Cette reconstitution animatronique d'un *Tyrannosaurus rex* est l'une des principales vedettes du spectacle *Walking with Dinosaurs*, qui s'est produit en Australie, en Amérique du Nord, en Europe et en Asie depuis 2007.



# 1 • Pourquoi c'est le dinosaure le plus étudié

Découvert au XX<sup>e</sup> siècle, le tyrannosaure, vedette de nombreuses fictions, a longtemps été délaissé par les paléontologues. Mais aujourd'hui, c'est un sujet d'étude incontournable. Un succès qu'il doit à Hollywood ?



**PAR Jean Le Loeuff**, directeur du Musée des dinosaures, à Espéraza, dans l'Aude.

« **V**ous devriez mentionner tous les projets de recherche fascinants sur les tyrannosaures que mène votre équipe, ou qu'elle voudrait mener.

Car la paléontologie n'est après tout qu'un dérivé de la tyrannosaurologie, et les étudiants veulent être au cœur de l'action. » Ce conseil (ironique) adressé il y a quelques mois par un paléontologue américain à une consœur qui souhaitait recruter des étudiants pour son université (mais pas du tout pour étudier des dinosaures...) est significa-

tif de la place qu'a prise *Tyrannosaurus rex* dans l'étude des espèces disparues. Ce dinosaure est aujourd'hui le cobaye favori des paléontologues, en particulier nord-américains, pour tester leurs nouvelles techniques d'investigation.

Il est vrai qu'il en imposait physiquement, avec ses douze mètres de long, ses sept tonnes, et son énorme gueule munie de dents tranchantes. Il a sans conteste dominé l'actuel ouest nord-américain, où il vivait, durant les deux ou trois millions d'années de son existence, à la fin du Crétacé. Et sa disparition, en même temps que la plupart des espèces de dinosaures il y a environ 66 millions d'années, a aussi fait couler beaucoup d'encre.

Pourtant, il a longtemps été négligé par les paléontologues. Peu après sa découverte au début du XX<sup>e</sup> siècle, il a été quasi oublié des études scientifiques. Il n'est devenu un objet de science très couru que depuis une vingtaine d'années, et seulement grâce à un détour inattendu par Hollywood.

**La conquête du Far West.** Au début du XX<sup>e</sup> siècle, les grands musées d'histoire naturelle de la côte est des États-Unis rivalisaient pour exposer dans leurs galeries les fossiles les plus spectaculaires. Sponsorisées par des milliardaires, tels l'industriel Carnegie à Pittsburgh ou le banquier Morgan à New York, ces institutions envoyaient des équipes de paléontologues parcourir le Far West, riche en gisements de dinosaures. Henry Fairfield Osborn, directeur du Muséum américain d'histoire naturelle de New York recruta en particulier dans ce but Barnum Brown. Ce dernier, « toujours tiré à quatre épingles, grand buveur, joueur, fumeur et l'un des plus prodigieux Don Juan de la discipline », selon ses biographes



**Barnum Brown (ici en 1901) a exhumé les os d'un dinosaure carnivore dans le Montana entre 1902 et 1905. Ces ossements furent décrits sous le nom de *Tyrannosaurus rex*, en 1905.**



Lowell Dingus et Mark A. Norell, était aussi un paléontologue de terrain de premier ordre [1]. C'était aux dires d'Osborn, « *le plus extraordinaire collecteur que j'aie jamais connu* ». Durant des décennies, il passa plusieurs mois par an dans l'ouest américain, à la recherche de nouveaux vertébrés fossiles.

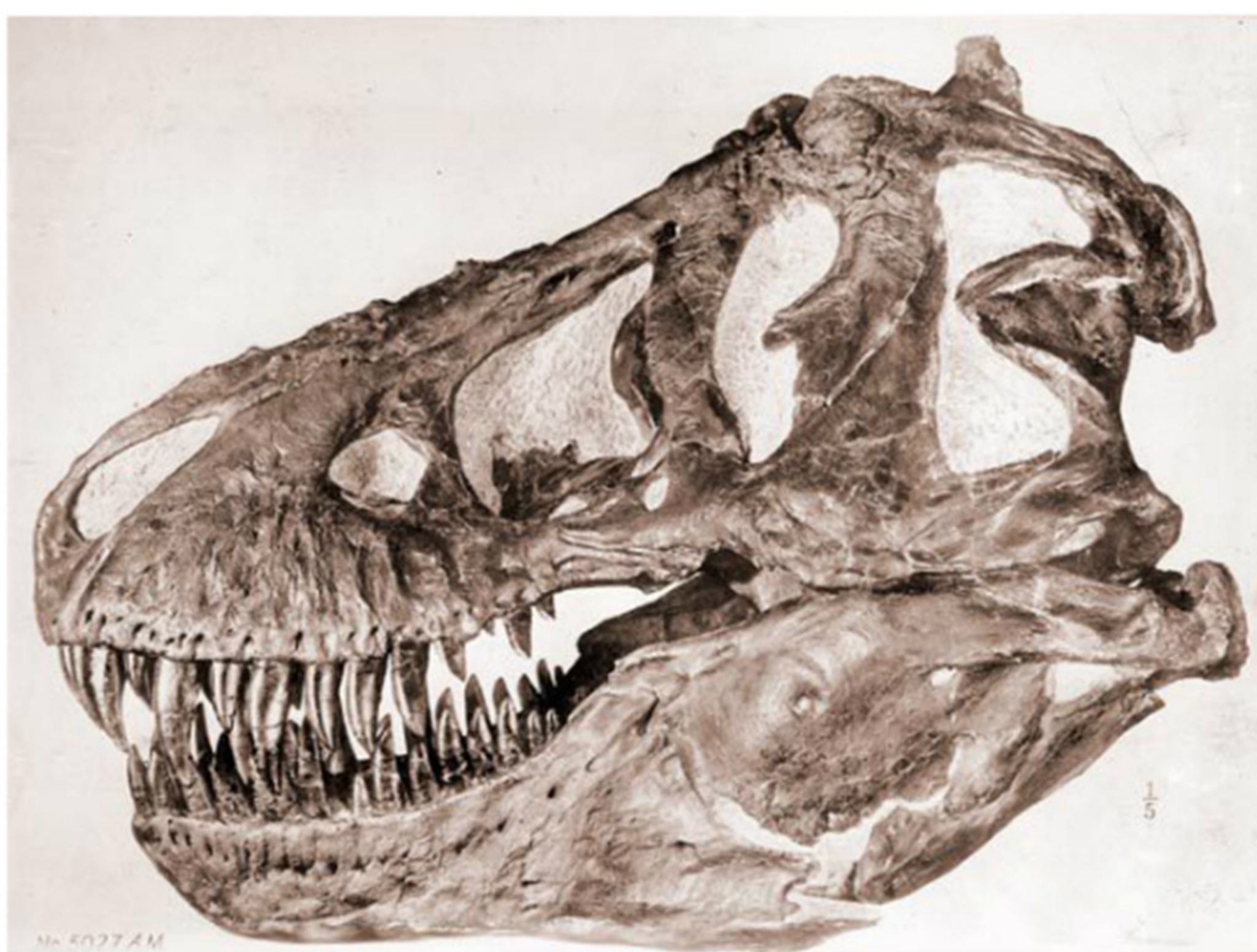
Entre 1902 et 1905, Brown exhuma le squelette partiel d'un très gros dinosaure carnivore dans le Montana, dont les restes furent brièvement décrits par Osborn en 1905 sous le nom de *Tyrannosaurus rex*. Mais surtout, à l'été 1908, Brown, toujours dans le Montana, mit la main sur un squelette presque complet, comprenant un crâne en très bon état de 1,5 mètre de long. Dès 1915, les visiteurs du Muséum purent admirer le squelette de 12 mètres de long dont le crâne culminait à plus de 5 mètres de haut.

**Un prédateur très populaire.** Osborn, qui l'étudia, conclut ses travaux en 1917 par quelques remarques destinées à souligner la portée de sa découverte : « *Tyrannosaurus est le plus superbe mécanisme carnivore chez les vertébrés terrestres, chez qui la puissance destructrice et la vitesse se combinent ; il représente le climax de l'évolution d'une série qui commença [...] au Trias* [2]. » *Tyrannosaurus* était effectivement alors, et de loin, le plus gros prédateur terrestre connu.

Malgré ces caractéristiques remarquables, pendant plus de quarante ans la paléontologie ne se pencha plus sur le tyrannosaure. Les études sur les dinosaures en général furent d'ailleurs assez largement délaissées durant cette période. Mais il ne fut pas oublié pour autant, bien au contraire. Osborn l'avait présenté à la presse américaine comme le monstre ultime, le plus grand prédateur de tous les temps, et il se produisit quelque chose qu'il n'avait sans doute pas prévu : son entrée immédiate dans la culture populaire.

C'est probablement Edgar Rice Burroughs, créateur de Tarzan, qui en fit le premier l'un des héros de ses cycles romanesques consacrés aux mondes perdus. Il envahit aussi la *pulp* littérature et les séries B du cinéma américain. En France, il resta plus discret, bien que Bob Morane, sous la plume d'Henri Vernes, l'ait croisé quand même régulièrement dans ses aventures à partir des années 1950.

C'est toutefois en 1993, avec le film *Jurassic Park*, de Steven Spielberg, que *T. rex* (prononcer *tirex*, à l'anglo-saxonne) devient un héros planétaire. *Jurassic Park* est un événement inouï pour le tout petit monde de la paléontologie dinosaurienne : jusque-là aucun étudiant de troisième cycle sensé



**1,5 mètre, c'est la longueur de ce crâne de *Tyrannosaurus rex*, découvert en 1907 par le paléontologue Barnum Brown dans le Montana. Il est aujourd'hui exposé au Muséum de New York.**

ne souhaitait travailler sur les dinosaures ; depuis, les apprentis paléontologues, notamment aux États-Unis, délaissent volontiers les primates et les poissons pour l'étude des « lézards terriblement grands ». Et les travaux scientifiques sur les dinosaures explosent depuis vingt ans.

Le succès du film montra aussi à certains que les dinosaures pouvaient rapporter gros. Les vendeurs de fossiles passèrent d'un certain artisanat à la grande distribution aux États-Unis. Des dizaines d'équipes de collecteurs privées se répandirent entre le Montana et le Dakota à la recherche de nouveaux tyrannosaures. Leur succès fut considérable puisque plusieurs dizaines de spécimens ont été découverts ces vingt dernières années.

Un squelette assez complet, en particulier, a été l'objet d'un feuilleton politico-économico- >>>

## L'essentiel

> **TYRANNOSAURUS REX** a été découvert et décrit au début du XX<sup>e</sup> siècle.

> **APRÈS L'AVOIR NÉGLIGÉ** pendant une longue période, les paléontologues s'y intéressent à nouveau seulement depuis le milieu des années 1990.

> **AUJOURD'HUI**, c'est le prototype de toutes les problématiques relatives aux dinosaures, ainsi que le fossile test pour les nouvelles méthodes.



## Pourquoi c'est le dinosaure le plus étudié

[1] L. Dingus et M. A. Norell, *Barnum Brown, The Man Who Discovered Tyrannosaurus rex*, University of California Press, 2010.

[2] H.F. Osborn, *Bulletin of the American Museum of Natural History*, 35, 733, 1917.

[3] C. Brochu, *J. Vertebr. Paleontol.*, 22, suppl. 4, 1, 2003.

[4] E. Wolff et al., *PlosOne*, 4(9), e7288, 2009.

[5] B. M. Rothschild, in *Tyrannosaurid paleobiology*, J. Parish et al. (dir.), Indiana University Press, 2013.

[6] L. Brown, *I Married a Dinosaur*, Coachwhip Publications, 2010.

>>> scientifique. Surnommé « Sue » par ses découvreurs, il fut saisi par le FBI, dans le cadre d'une bataille juridique entre le propriétaire d'un ranch, la réserve sioux voisine et la société qui l'avait extrait, et finalement acheté par les sociétés McDonald's et Coca Cola qui l'ont offert au Field Museum de Chicago. Le découvreur, lui, s'est non seulement vu confisquer le squelette mais il a été envoyé à l'ombre pour fraude fiscale...

**Première monographie.** Après ces péripéties, Sue a été étudié(e ?) en détail par Christopher Brochu, du Field Museum. Ce dernier a produit en 2002 la première monographie sur *Tyrannosaurus rex* depuis Osborn, signant le grand retour de l'animal dans le champ de la paléontologie [3]. Christopher Brochu a ainsi ouvert un bon nombre de problématiques qui sont depuis approfondies à l'aide de nouvelles techniques d'investigation et des nouveaux squelettes mis au jour. Le tyrannosaure était-il chasseur ou charognard ? Et d'abord que mangeait-il vraiment ? À quelle vitesse grandissait-il ?

De nouvelles études des tissus osseux des dinosaures permettent par ailleurs de déterminer l'âge de certains individus au moment de leur mort. Appliquées à *Tyrannosaurus rex*, elles ont donné des résultats sensationnels : le

plus gros individu étudié est mort à 28 ans seulement. La croissance des dinosaures était donc d'une rapidité dont nous cherchons encore les mécanismes. Ces travaux remettent aussi en question la systématique généralement acceptée, certaines « espèces » étant désormais considérées comme des juvéniles de *Tyrannosaurus rex*, même si le débat est loin d'être clos.

Les études se multiplient ces dernières années, par exemple sur la paléopathologie de *Tyrannosaurus*, et l'on se penche sur des détails qui naguère auraient été négligés : ces perforations dans la mâchoire inférieure de Sue sont-elles dues à une infection commune chez les oiseaux, une trichomonose [4] ? Non, ce seraient plutôt des coups de griffes d'un autre tyrannosaure qui ont ainsi perforé l'os [5]. Cela conduit à quelques spéculations paléocomportementales : les tyrannosaures se taquinaient-ils en s'infligeant de profondes blessures à l'aide de ces minuscules pattes antérieures dont l'utilité a fait l'objet de tant de débats ?

**Questions en suspens.** Que manque-t-il encore après cette avalanche de travaux scientifiques pour tout savoir du « bébé préféré » de Barnum Brown [6] ? Beaucoup de choses en fait. Avait-il des plumes ? Aujourd'hui que la nature dinosaurienne des oiseaux est définitivement démontrée, et que l'on découvre de plus en plus d'espèces de dinosaures à plumes, l'interrogation est de mise.

Les quelques fragments de peau de son cousin *Tarbosaurus* montrent un cuir écailleux. Pourtant certains tyrannosauroïdes (ou supposés tels) possédaient des proto-plumes. Ont-elles disparu durant l'évolution menant aux Tyrannosauridés, ou ne recouvraient-elles qu'une partie de l'animal, voire seulement les jeunes comme certains l'ont supposé ?

On le voit, aucun détail de l'anatomie de *Tyrannosaurus rex* n'échappe à la sagacité des paléontologues, tandis que les centaines d'autres espèces de dinosaures connues sont souvent étudiées plus sommairement. Les travaux sur son cas inspirent des recherches sur d'autres groupes, et toute nouvelle méthode d'investigation se doit d'être testée sur lui. Être une vedette du box-office ne l'a donc finalement pas empêché de faire progresser nos connaissances sur la paléobiologie des dinosaures : « Tyrex » est aussi un formidable support d'investigation scientifique, qui aide à repousser année après année certaines limites de la paléontologie que l'on croyait indépassables il y a vingt ans. ■

## Jurassic Park et la fin du tyrannosaure kangourou



À la sortie du film *Jurassic Park*, en 1993 (photographie ci-contre), les visiteurs habitués du Muséum américain d'histoire naturelle de New York ont dû ressentir un certain étonnement. Le tyrannosaure qui y galopait avec une colonne vertébrale horizontale n'avait pas grand-chose à voir avec le « tyrannosaure kangourou » qui leur était présenté depuis 1915. Malgré le peu d'études sur *Tyrannosaurus rex* entre les années 1910 et 1990, ce détail n'était pas sorti de l'imagination débridée de Steven Spielberg, mais de paléontologues qui, à la fin des années 1970, avaient recommencé à s'intéresser à ces animaux géants. Le Muséum adapta sa présentation seulement en 1995.



# GRAND JEU CONCOURS

# LIBERATION

Editez votre album de famille

A l'occasion des commémorations du cinquantième de la libération de la France, Historia vous propose un jeu-concours inédit.



L'ALBUM  
DE NOTRE  
HISTOIRE

Partagez et racontez l'histoire de votre famille ou de vos proches, en réalisant l'album de votre histoire. Trésors enfouis, carnets de vie quotidienne, photographies de famille... autant de témoignages précieux de cette époque qu'Historia propose de partager et de publier.

Inscriptions jusqu'au 31 mai, informations et dotations :

[www.lalbumdenotrehistoire.fr](http://www.lalbumdenotrehistoire.fr)

En partenariat avec

Historia

 Pixalib



# 2 • Une histoire de famille enfin démêlée

Les tyrannosaures, plus gros prédateurs terrestres, ont longtemps été considérés comme les descendants ultimes d'autres dinosaures géants. À tort, selon les plus récentes découvertes.



**PAR Thomas Holtz**, professeur de paléontologie à l'université du Maryland, aux États-Unis.

**T**yrannosaurus rex est probablement le dinosaure le plus célèbre. Vedette de *Jurassic Park* et d'innombrables autres films, romans et bandes dessinées, pièce centrale de beaucoup de musées, et sujet de nombreuses publications scientifiques, ce géant carnivore de la fin du Crétacé est aussi familier au grand public qu'aux paléontologues.

Les premiers fragments fossiles, une dent incomplète et quelques os, ont été recueillis dans l'Ouest américain dans les années 1870. Mais c'est au début

du XX<sup>e</sup> siècle que le premier squelette assez complet a été trouvé dans le Wyoming, par Barnum Brown, du Muséum d'histoire naturelle de New York, et décrit par Henry Fairfield Osborn, directeur du Muséum (lire « Pourquoi c'est le dinosaure le plus étudié », p. 28). C'est lui qui nomma la nouvelle espèce *Tyrannosaurus rex* : le « roi des lézards tyrans » [1]. L'animal dépassait en effet les autres grands dinosaures carnivores connus, rassemblés dans la famille des théropodes tels *Allosaurus*, *Caratosaurus* ou *Megalosaurus*, et qui vivaient plusieurs dizaines de millions d'années avant lui.





En outre, *Tyrannosaurus rex* était si différent de ces théropodes géants que les paléontologues avaient du mal à retracer son histoire évolutive. Et, malgré quelques progrès, cette situation perdura jusqu'à la fin du XX<sup>e</sup> siècle. Ce n'est que très récemment, notamment grâce à la découverte de nombreux nouveaux fossiles de dinosaures de différentes époques, qu'un scénario assez précis a été élaboré. Nous avons désormais la certitude que *Tyrannosaurus rex* ne descendait pas des grands théropodes du Jurassique et du début du Crétacé. Ses ancêtres, à cette époque, étaient des animaux beaucoup plus petits.

**Signes distinctifs.** Osborne avait immédiatement noté de fortes différences entre *Tyrannosaurus rex* et les théropodes géants. Ses dents, d'abord, n'avaient pas la forme habituelle en lame de couteau à viande. Les dents prémaxillaires (à l'avant de la mâchoire supérieure) étaient petites et avaient une forme d'incisive, adaptée à l'arrachage de la viande. Les dents du maxillaire (mâchoire supérieure) et du dentaire (mâchoire inférieure) étaient extraordinairement grandes, épaisses d'un côté à l'autre et profondément enracinées (2/3 de racine pour 1/3 de couronne), tandis que chez la plupart des théropodes, racine et couronne ont à peu près la même hauteur.

Par ailleurs, ses bras étaient extrêmement courts. Son crâne, au contraire, était puissamment développé, avec une partie postérieure exceptionnellement large, et fortement musclée. Et alors que la plupart des théropodes avaient une paire d'os nasaux séparés tout le long du museau, chez le tyrannosaure ceux-ci étaient fusionnés en une seule structure.

Dès le début du XX<sup>e</sup> siècle, *Albertosaurus* et *Gorgosaurus*, deux proches parents de *Tyrannosaurus rex*, ont été découverts, au Canada, et décrits. Ces espèces étaient un peu plus anciennes, et plus petites (elles atteignaient quand même 9 mètres de long, et peut-être 2,5 tonnes). On rassembla les trois espèces dans la famille des *Tyrannosauridae* (ou tyrannosauridés).

Les fossiles d'*Albertosaurus* et de *Gorgosaurus* montrèrent que les bras des tyrannosauridés n'étaient pas seulement courts, mais aussi réduits : ils n'avaient que deux doigts fonctionnels, alors



**Au Crétacé, les continents n'occupaient pas leurs places actuelles, et le niveau des mers était plus élevé. Un passage terrestre reliait l'Asie à l'Amérique du Nord, ce qui explique la présence d'ancêtres et d'espèces proches des tyrannosaures sur ces deux continents.**

© RON BLAKEY/COLORADO PLATEAU GEOSYSTEM

que la plupart des théropodes en possédaient trois. En outre, ces spécimens avaient des pattes postérieures et des pieds complets qui, eux aussi, différaient de ceux des théropodes. La plupart de ces derniers avaient des pieds élargis, où les trois os longs qui soutiennent le poids, les métatarsiens, ont à peu près la même longueur. Chez les tyrannosauridés, au contraire, tout le pied était mince, étroit et verrouillé avec le métatarsien du milieu en forme de coin à la base et pincé entre les deux autres os au-dessus (ce que j'ai nommé « arctométatarsaire » ou « métatarsaire pincé », en 1990) [2]. Plus tard, d'autres découvertes confirmèrent que *Tyrannosaurus rex* partageait toutes ces caractéristiques. >>>

## L'essentiel

- > **TYRANNOSAURUS REX** et plusieurs espèces proches ont été les derniers des plus gros dinosaures, à la fin du Crétacé.
- > **DE NOMBREUX PALÉONTOLOGUES** au cours du XX<sup>e</sup> siècle pensaient qu'ils descendaient d'autres animaux géants, les allosaures et les mégaloaures.
- > **LES PROGRÈS** de l'analyse phylogénique et des découvertes de nombreux nouveaux fossiles ont révélé que leurs ancêtres directs étaient en fait des animaux plus petits.

**« Samson », squelette de 170 os déterré en 1992 dans le Dakota du Sud, âgé de 66 millions d'années, est l'un des spécimens de *Tyrannosaurus rex* les plus complets et les plus récents.**



## Une histoire de famille enfin démêlée

\* **UNE SUPER-FAMILLE** est une division de la classification phylogénique située entre l'ordre (des dinosaures) et la famille.

>>> D'autres tyrannosauridés ont été trouvés au XX<sup>e</sup> siècle, en Mongolie et en Chine. Et deux fossiles qui avaient été classés dans le genre *Gorgosaurus* ont été reconnus comme des espèces distinctes, plus proches encore de *Tyrannosaurus rex* [3]. Cependant, toutes ces espèces ressemblaient trop à ce dernier. Elles dataient aussi, comme lui, de la fin du Crétacé supérieur (il y a entre 80 et 66 millions d'années). Elles n'étaient donc pas utiles pour déterminer les relations de parenté entre les tyrannosauridés et tous les autres théropodes.

**Deux théories et un scénario.** Cela n'empêcha toutefois pas les paléontologues de spéculer sur l'origine des tyrannosauridés. Deux hypothèses principales ont été proposées dès les années 1910 et 1920. La première, défendue en particulier par Osborn, était que tous les grands théropodes connus, du Trias au Jurassique supérieur, ainsi que les tyrannosauridés du Crétacé supérieur, formaient une seule lignée. Les animaux étaient de plus en plus grands, avec des crânes proportionnellement de plus en plus importants, des dents de plus en plus puissantes et des bras de plus en plus petits. Cela correspondait avec le point de vue d'Osborn selon lequel l'évolution était dominée par des branches uniques sélectionnées pour des traits particuliers.

D'autres chercheurs (dont Barnum Brown, mais aussi l'allemand Friedrich von Huene) avaient une autre théorie [4]. Ils ne comparaient pas seulement les tyrannosauridés aux carnivores géants, mais aussi aux plus petits théropodes du

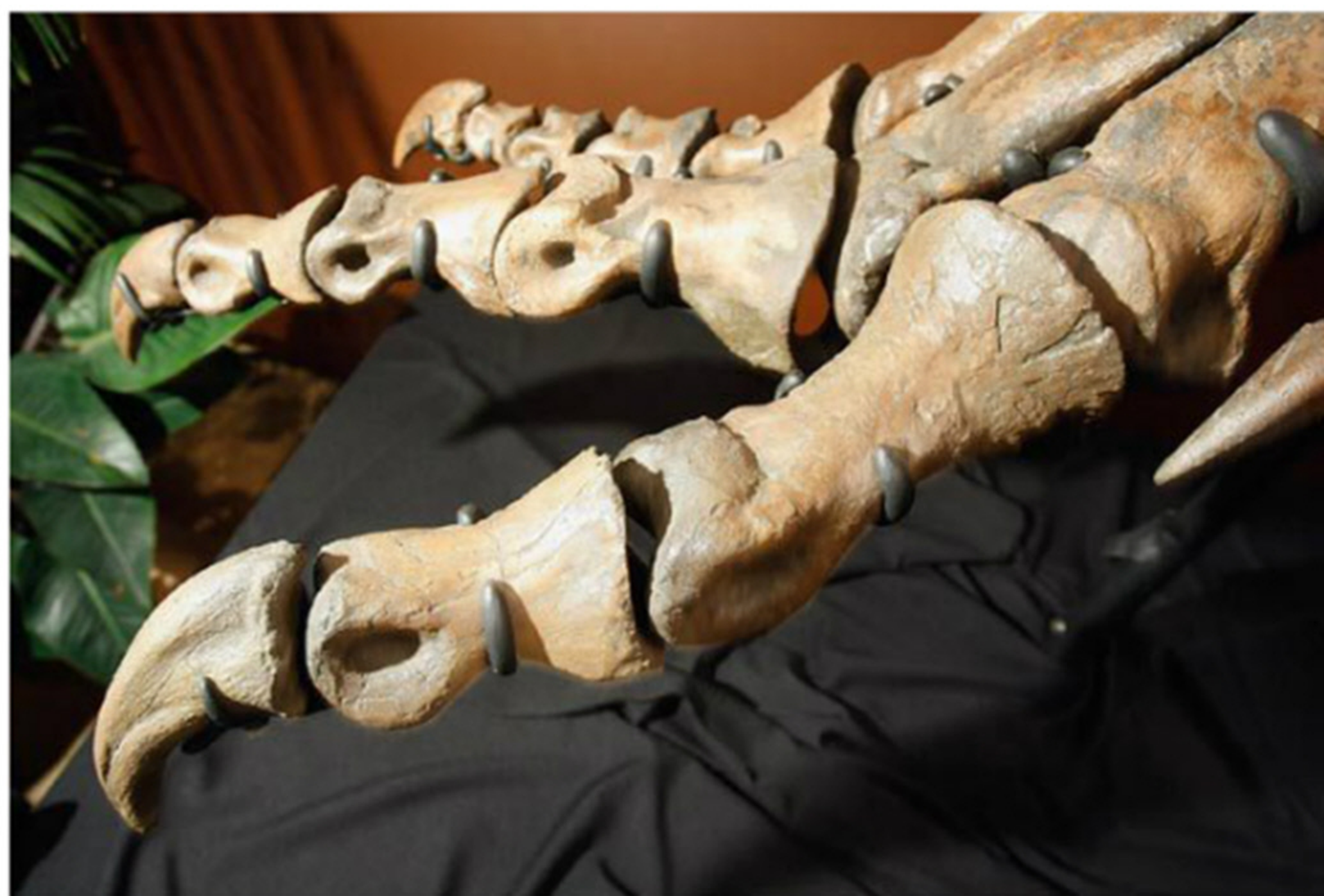
Jurassique et du Crétacé. Von Huene regroupa ces petits dinosaures, tel *Compsognathus* (un mètre de long), *Ornitholestes* (deux mètres), *Coelurus* et *Velociraptor*, ainsi que les ornithomimidés (de trois à cinq mètres), dans une superfamille\* qu'il nomma *Coelurosauria*, et dont les tyrannosauridés étaient, selon lui, issus.

Si l'on faisait abstraction de leur taille, les espèces de *Coelurosauria* partageaient en effet de nombreux traits anatomiques avec les tyrannosauridés. Par exemple, leurs pattes postérieures, ainsi que leurs mains, étaient longues et fines. Différents os du bassin avaient les mêmes formes. Leurs vertèbres contenaient des poches à air de formes semblables. Et les pieds des ornithomimidés possédaient un arctométatarse.

Pendant plusieurs décennies, ces deux hypothèses coexistèrent : leurs tenants n'avaient pas de méthode pour faire pencher la balance définitivement en faveur de l'une ou de l'autre. Les choses ne commencèrent à changer qu'avec la généralisation de la cladistique, méthode de phylogénie systématique qui permet d'évaluer quantitativement les relations possibles entre les espèces, sur la base de la répartition des transformations évolutives. Comme le nombre de possibilités (et les calculs de leur valeur statistique relative) devient rapidement très grand, la cladistique dut attendre l'apparition des ordinateurs pour être utilisable.

À la fin des années 1980 et au début des années 1990, plusieurs études indépendantes ont enfin pu être menées avec cette méthode à propos des tyrannosauridés, par moi-même, par Fernando Novas du musée des sciences naturelles Bernardino Rivadavia de Buenos Aires, en Argentine, par Philip Currie, du Muséum royal Tyrrell de paléontologie à Drumheller, au Canada, et par Paul Sereno de l'université de Chicago, aux États-Unis. Et nous sommes tous arrivés à la même conclusion : les tyrannosauridés étaient bien plus étroitement apparentés à de petits théropodes du Crétacé, des « raptors » tels que *Deinonychus*, *Velociraptor* et *Troodon*, qu'aux théropodes géants du Jurassique. J'ai surnommé cette hypothèse le scénario « Tyranno-raptor ». Et Paul Sereno a officialisé ce nom en reconnaissant *Tyrannoraptora* comme la subdivision officielle de *Coelurosauria* qui comprenait les tyrannosauridés, les oiseaux et tous les dinosaures descendant de leur ancêtre commun.

Ce scénario ne reposait toutefois, pour ce qui concernait les tyrannosauridés, que sur l'étude des géants du Crétacé supérieur. Aucun fossile des phases antérieures de leur évolution n'avait été trouvé. Cela allait heureusement changer à l'aube du nouveau siècle.



Le pied de *Tyrannosaurus rex* avait, comme celui des autres tyrannosauridés, une structure particulière qui absorbait les chocs et le rendait plus agile que les autres grands dinosaures.



## « Le tyrannosaure tuait pour se nourrir »



Ronan Allain est paléontologue au Muséum national d'histoire

naturelle, à Paris. DR

### Comment sait-on que *Tyrannosaurus rex* était bien carnivore ?

**R.A.** Tout d'abord, il possédait tous les attributs anatomiques d'un carnivore : des mâchoires d'une puissance capable de sectionner en deux une carcasse de bœuf d'un seul coup, des dents acérées, une musculature impressionnante, des pattes postérieures très développées pour se mouvoir sans difficulté. De plus, on a retrouvé des ossements dans des excréments fossilisés de tyrannosaure. Enfin, on a aussi découvert des traces de morsures de *Tyrannosaurus rex* sur des os fossilisés d'hadrosaures, des dinosaures herbivores. Tout cela prouve qu'il se nourrissait de la chair de ses contemporains.

### Pourquoi certains paléontologues pensent-ils qu'il était charognard ?

**R.A.** Cette hypothèse est principalement défendue par Jack Horner, de l'université du Montana, aux États-Unis. Elle se fonde par exemple sur la corpulence de *Tyrannosaurus rex* : avec ses douze mètres de long pour quatre de haut, il n'aurait pas dépassé les 20 kilomètres à l'heure. Mais cette vitesse était bien suffisante pour poursuivre de gros dinosaures herbivores. Autre argument : ses lobes olfactifs étaient

très développés, un atout pour repérer des charognes à distance. Mais des études ont montré que ce n'est pas une caractéristique exclusive des charognards. Enfin, ses yeux sont jugés trop petits pour lui offrir une vue assez perçante pour un prédateur. Mais ici aussi des études ont montré que contrairement à d'autres dinosaures, ses yeux étaient rapprochés sur la face offrant une vision stéréoscopique, courante chez les prédateurs.

### Pour autant, cette hypothèse est-elle définitivement invalidée ?

**R.A.** à mon sens oui, notamment parce qu'on a aussi retrouvé des os de dinosaures ayant cicatrisé après une morsure de *Tyrannosaurus rex*. Ces dinosaures étaient donc vivants quand ils ont été mordus. Or il n'y a strictement aucune raison qu'un tyrannosaure se soit battu avec eux si ce n'est pour essayer de les manger. Enfin, s'il en était encore besoin, la preuve irréfutable que celui-ci était bien un prédateur a été donnée l'an passé. Des paléontologues ont en effet découvert un morceau de dent de *Tyrannosaurus rex*, de 3,75 centimètres de long planté entre les vertèbres fossilisées de la queue d'un hadrosaure, qui, elles aussi, avaient cicatrisé [1]. Pour moi, le débat est définitivement clos. Mais bien sûr, comme tous les prédateurs actuels, le tyrannosaure ne devait pas dédaigner se repaître d'une bonne charogne fraîche à l'occasion. ■ **Propos recueillis par Jean-Philippe Braly**

[1] R. A. De Palma et al., *PNAS*, doi:10.1073/pnas.1216534110, 2013.

En 1997, les restes d'un coelurosaurien de taille moyenne ont été trouvés dans des roches du Crétacé inférieur, datant de 130 millions d'années, dans l'île de Wight, au Royaume-Uni. Ce dinosaure avait une longueur d'environ 4 mètres. Bien que le squelette soit incomplet, certaines caractéristiques clés sont apparues à Steven Hutt, du Muséum de l'île de Wight, et à ses collègues. Ses dents maxillaires et dentaires étaient en forme de lame simple, ses bras étaient longs et minces, et ses mains à trois doigts capables d'agripper étaient typiques des coelurosauriens. Cependant, comme les tyrannosauridés, il avait des dents prémaxillaires en forme d'incisives, et les os nasaux fusionnés.

**Tyran de l'aube.** En 2001, ils ont donc décidé d'appeler ce nouveau spécimen *Eotyrannus*, « tyran de l'aube » [5]. Il indiquait clairement une origine coelurosaurienne pour les tyrannosauridés. Mais comme il n'avait pas toutes les caractéristiques de ces derniers, il a été placé dans le groupe plus large des *Tyrannosauroides* (tyrannosauroides). *Eotyrannus* était loin d'être le prédateur dominant de son environnement.

En 2004, un autre tyrannosauroïde a été décrit. Découvert dans la province de Liaoning, dans le nord-est de la Chine, il a été nommé *Dilong* (« dragon empereur ») [6]. Il mesurait 1,5 mètre de long. Il avait, lui aussi, des dents prémaxillaires en forme d'incisives et les os nasaux fusionnés. Et, comme les coelurosauriens primitifs, il avait de fines mains à trois doigts et des dents maxillaires et dentaires en forme de lame.

Cette découverte fut suivie par celle d'un tyrannosauroïde encore plus ancien, du Jurassique supérieur, de l'autre côté de la Chine, au Xinjiang : *Guanlong* (dragon couronné) [7]. Il avait environ la taille d'*Eotyrannus*, et des bras encore plus long et élancés. Contrairement aux autres tyrannosauroides, ses os nasaux fusionnés étaient couronnés par une crête grande et mince. Comme *Eotyrannus*, il n'était pas le prédateur dominant dans son environnement.

L'étude de ces tyrannosauroides plus primitifs a aussi conduit à reclasser dans ce groupe des fragments de fossiles connus précédemment. Parmi eux, *Proceratosaurus*, du Jurassique moyen, en Angleterre, *Stokesosaurus*, du Jurassique supérieur, et *Dryptosaurus*, du Crétacé supérieur, aux États-Unis.

Ces dernières années les découvertes de tyrannosauroides du Jurassique et du Crétacé se sont multipliées à travers le monde. Certains sont de nouvelles formes de tyrannosauridés proprement dits, du Crétacé supérieur, >>>



## Une histoire de famille enfin démêlée

>>> comme *Lythronax*, du sud-ouest de l'Amérique, ou *Zhuchengtyrannus*, de Chine. D'autres, comme *Teratophoneus* et *Bistahieversor*, du Crétacé supérieur, en Amérique du sud-ouest, sont soit de vrais tyrannosauridés, soit en sont extrêmement proches. D'autres encore, comme *Kileskus* du Jurassique moyen, en Russie, et *Sinotyrannus*, du Crétacé inférieur, en Chine, sont étroitement apparentés à d'autres formes (en l'occurrence *Proceratosaurus*).

**Période charnière.** Mais surtout, deux espèces du Crétacé inférieur, trouvées en Chine, ont révélé d'importantes transitions dans l'évolution des tyrannosauroïdes. D'abord, en 2010, une équipe américano-chinoise a décrit *Xiongguanlong*, de 4,5 mètres de long [8]. Comme les autres tyrannosauroïdes primitifs, c'était un nain à côté des allosaures géants qui parcouraient le monde à cette époque. Bien que son crâne soit trop primitif pour qu'il soit un vrai tyrannosauridé, l'arrière de son crâne est plus développé que chez les autres tyrannosauroïdes primitifs. Cela, et d'autres

caractéristiques des dents et des vertèbres, montre qu'il est probablement le parent le plus proche des ancêtres de *Tyrannosaurus rex* au Crétacé inférieur. Malheureusement, nous n'avons pas encore ses bras, et nous ne savons donc pas si ses mains pouvaient agripper, ou si elles étaient déjà atrophiées comme celles des tyrannosauridés.

Puis, en 2012, une autre équipe a décrit *Yutyrannus*, tyrannosauroïde plus ancien, et apparemment plus primitif que *Xiongguanlong* [9]. C'était aussi un assez grand carnivore (atteignant probablement 7 ou 8 mètres de long). Il avait encore des mains avec trois doigts puissants pouvant agripper, et des dents comme des lames plutôt que des dents épaisses, mais ses os nasaux étaient fusionnés et ses dents de devant en forme d'incisives étaient typiques des tyrannosauroïdes.

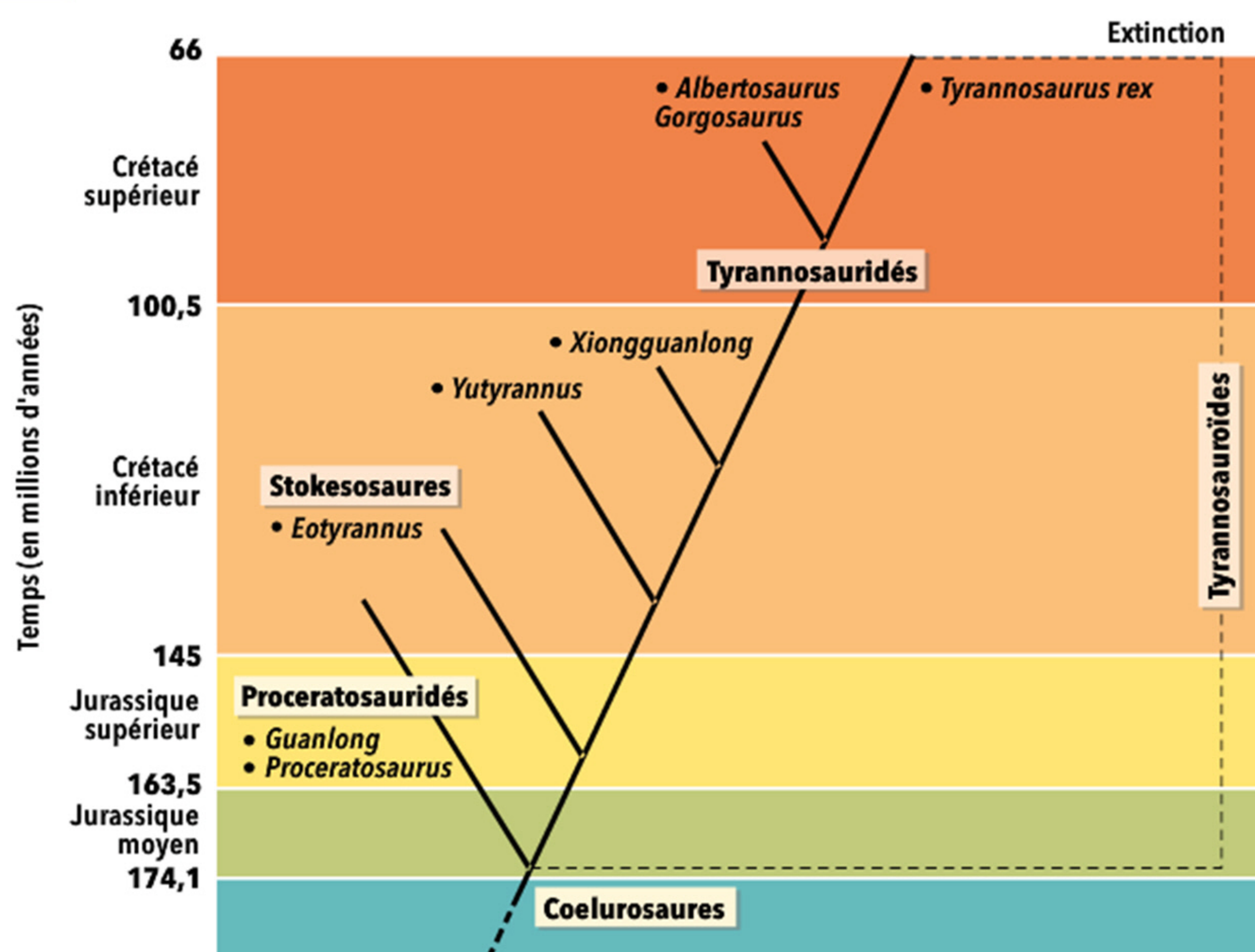
Ces découvertes nous permettent aujourd'hui de décrire assez précisément l'évolution qui a conduit à *Tyrannosaurus rex*. Le Jurassique moyen et le Jurassique supérieur ont été des périodes déterminantes dans l'histoire des dinosaures. Les prosauropodes et les carnivores primitifs qui régnaient

jusque-là sur les écosystèmes avaient disparu, et les groupes qui dominaient pour les 100 prochains millions d'années se diversifiaient. Pour les herbivores, il s'agissait des sauropodes géants au long cou, des premiers ankylosaures et stégosaures cuirassés, et des ornithomimes à becs et des cératopsiens à collerettes.

Du côté des carnivores, les mégalosaures et les allosaures apparurent à cette époque, comme les cératosaures de taille moyenne. De plus petite taille, les coelurosaures possédaient des pieds agiles et des mains capables d'agripper. Certains ont rapidement développé de grandes plumes pour pouvoir planer (et parfois voler), et d'autres ont changé d'alimentation, se nourrissant d'insectes ou même de plantes.

C'est parmi les coelurosaures que sont apparus,

**Fig.1** Arbre phylogénétique



**TYRANNOSAURUS REX**, avec les autres tyrannosauridés apparus il y a environ 90 millions d'années, ont été les derniers représentants de l'évolution des tyrannosauroïdes, branche des coelurosaures. Les premières espèces au Jurassique moyen, les proceratosauridés, étaient de petits animaux carnivores, qui n'étaient pas les prédateurs dominants de leur environnement. © INFOGRAPHIE BRUNO BOURGEOIS



## Les tyrannosaures avaient-ils des plumes ?

Dans les années 2000, du duvet et même des plumes ont été observés autour des squelettes de dinosaures coelurosauriens. Ce n'était pas très étonnant, car on savait déjà que les oiseaux étaient apparus au sein de ce groupe. *Sinosauropteryx*, du groupe des compsognathidés, qu'au moins une partie des analyses phylogénétiques placent plus loin des oiseaux que les tyrannosauroïdes, n'avait, lui, pas de plumes, mais un simple duvet. Cela suggérait que le dernier ancêtre commun des compsognathidés, des oiseaux et des tyrannosauroïdes (donc des tyrannosaures) était au moins duveteux. En 2004, la découverte que *Dilong*, petit tyrannosauroïde de 1,5 mètre de long, possédait un duvet (ci-contre), a confirmé que cette caractéristique avait été conservée dans ce groupe. Et la description, en 2012, d'un duvet de 20 centimètres de long couvrant *Yutyrannus*, tyrannosauroïde primitif d'environ 1,4 tonne, a indiqué que même des animaux assez gros en possédaient aussi. Rien ne s'oppose donc à ce que les tyrannosauridés, descendants des tyrannosauroïdes, et en particulier *Tyrannosaurus rex*, aient été également couverts de duvet.



Des traces de duvet entourent les os fossilisés de *Dilong*, membre des tyrannosauroïdes, groupe ancestral des tyrannosaures. © XU XING/SCIENCE/AAAS

au Jurassique moyen, les premiers tyrannosauroïdes : les proceratosauridés, tels *Proceratosaurus*, *Guanlong* et *Kileskus*. Ils pouvaient attraper leurs proies avec leurs longues mains, et les découper avec leurs dents comme des couteaux. Leurs mâchoires étaient assez délicates selon les normes des tyrannosauroïdes, et donc leurs proies étaient probablement de plus petits dinosaures, des mammifères, et d'autres animaux légers (ils laissaient les sauropodes et les stégosaures aux allosaures et aux mégalo-saures). Leurs os nasaux fusionnés donnaient tout de même à leurs gueules une plus grande force pour mordre et leurs dents de devant leur permettaient de déchirer la viande plus efficacement. Tous les proceratosauridés connus possèdent une crête sur le crâne. Certaines espèces ont survécu jusqu'au Crétacé inférieur.

**Règne exclusif.** Au Jurassique supérieur, une lignée voisine de celle des proceratosauridés est apparue : celle des stokesosaures, dont *Eotyrannus* est le mieux connu. Leur morsure était devenue plus puissante, mais leurs bras devaient toujours être leur principal moyen d'obtenir leurs proies.

D'autres branches de l'arbre généalogique du tyrannosaure divergent au Crétacé inférieur. Parmi elles, celle qui contient *Xiongguanlong* et sa famille, ancêtres des tyrannosauridés. Dans ces formes, la morsure est clairement devenue assez forte, et le crâne est l'arme principale. À un moment (peut-être déjà chez *Xiongguanlong*, dont nous ne connaissons malheureusement pas le pied) l'arctométatarse est apparu. Cette adap-

tation a agi comme un absorbeur de choc, permettant aux dinosaures de courir et de tourner plus agilement.

Puis, au milieu du Crétacé supérieur, il y a environ 90 millions d'années, quelque chose s'est produit qui a mis fin au règne des allosaures et des mégalo-saures. Est-ce l'apparition de tyrannosauridés géants, qui les auraient supplantés ? Comme ces derniers vivaient presque exclusivement dans l'hémisphère Nord, et que l'extinction des allosaures et des mégalo-saures a été mondiale, cela semble peu probable.

Quoi qu'il en soit, les allosaures et les mégalo-saures n'étaient plus les prédateurs dominants. Dans les continents du Sud, les abelisaures ont joué ce rôle. En Asie et en Amérique du Nord, les tyrannosauridés géants ont évolué, à partir de leurs prédécesseurs de taille moyenne.

À partir de cette époque, les principaux prédateurs sur ces deux continents ont tous été des tyrannosauridés. Contrairement aux écosystèmes précédents, où il y avait une palette de prédateurs de différentes tailles parmi les théropodes, le règne des tyrannosaures était exclusif. Les seuls autres dinosaures entièrement carnivores de leur environnement étaient des raptors moins gros qu'un homme adulte.

Cette domination dura environ 25 millions d'années. Elle prit fin en même temps que le Crétacé. *Tyrannosaurus rex* fut le dernier des dinosaures géants. Il est probable que certains membres de cette espèce aient regardé vers le Sud quand un astéroïde a frappé la péninsule du Yucatán, au Mexique, il y a 66 millions d'années. ■

[1] H. F. Osborn, *Bulletin of the American Museum of Natural History*, 21, 259, 1905.

[2] T. R. Holtz Jr., *Journal of Vertebrate Paleontology*, 14, 480, 1995.

[3] W. D. Matthew et B. Brown, *Bulletin of the American Museum of Natural History*, 46, 367, 1922.

[4] F. von Huene, *Revista Museo de la Plata*, 29, 35, 1926.

[5] S. Hutt et al., *Cretaceous Research*, 22, 227, 2001.

[6] X. Xu et al., *Nature*, 431, 680, 2004.

[7] X. Xu et al., *Nature*, 439, 715, 2006.

[8] S. L. Brusatte et al., *Science*, 329, 1481, 2010.

[9] M. A. Loewen et al., in D. C. Evans (dir.), *PLoS ONE*, 8, e79420, 2013.



# 3 • Ce qui reste à découvrir sur T-rex

Plusieurs énigmes subsistent quant à la biologie et au comportement de ce carnivore géant. Les paléontologues se mobilisent pour apporter des réponses, mais celles-ci sont aussi conditionnées à la découverte de fossiles.

## À quoi ressemblaient les jeunes ?

*Tyrannosaurus rex*, à l'instar de tous les autres dinosaures, devait pondre. Mais aucun œuf lui appartenant n'a encore été identifié. L'embryon ou le bébé tyrannosaure restent donc un mystère. Plus troublant, les plus petits tyrannosaures connus sont de jeunes adultes longs de 6 à 7 mètres. Une forme un peu plus petite, de longueur estimée à 5 mètres, a été attribuée à une autre espèce, le « tyrannosaure nain » *Nanotyrannus lancensis*. Mais, selon certains paléontologues, ce serait simplement un jeune *Tyrannosaurus*.



## À quoi servaient ses bras ?

L'Américain Henry Osborn, qui a décrit le premier spécimen, y avait vu des crochets permettant au mâle d'agripper la femelle au moment du coït. D'autres paléontologues supposent que ces petits bras aidaient à la stabilisation du corps de l'animal avant que ses puissantes pattes ne le propulsent en hauteur, lorsqu'il se relevait après s'être couché, (un peu comme chez les sprinters au moment du départ). D'autres, enfin, pensent que ces bras ne seraient que d'inutiles reliques de l'évolution.





## Y avait-il des différences entre les mâles et les femelles ?

Pour la plupart des espèces de dinosaures, l'interrogation demeure. Mais pour *Tyrannosaurus rex*, la question est peut-être résolue : les formes les plus robustes seraient les femelles. On a en effet découvert chez certains spécimens de l'os médullaire. Or, pour les oiseaux, dont la lignée est proche de celle des tyrannosaures, ce type d'os se développe chez les femelles au moment de la ponte.



## Avait-il des plumes ?

Différents dinosaures carnivores plus primitifs que lui possédaient des proto-plumes, et l'on suppose donc que leurs descendants (dont *Tyrannosaurus rex*) devaient aussi en avoir. Mais le seul fragment de peau connu de l'un de ses proches cousins, *Tarbosaurus*, montre une peau écailleuse et pas la moindre trace de plumes. Ont-elles disparu secondairement chez les grands tyrannosauridés ? Ou étaient-elles circonscrites à une partie du corps ? Seule la découverte de « momies » de tyrannosaures permettra de trancher.



## À quelle vitesse courait-il ?

Rattrapait-il des jeeps comme dans le film de Steven Spielberg *Jurassic Park* ? Les modèles biomécaniques donnent des réponses fort variées de sa vitesse de pointe : entre 40 et 70 kilomètres à l'heure. Avec un tel écart il est difficile de leur faire confiance. Les empreintes de pas fossilisées ne sont pas d'une aide considérable puisqu'on ne connaît qu'une seule grosse trace attribuée à un tyrannosaure. Or, pour déterminer la vitesse d'un animal à partir de ses empreintes, il en faut au moins deux successives.



TEXTE JEAN LE LÉUFF  
© ILLUSTRATIONS MICHEL SAEMANN



# 4 • Les dinosaures avaient le sang chaud

Les tyrannosaures avaient beau être des reptiles, ils produisaient eux-mêmes leur chaleur interne. C'est la composition chimique de leurs dents qui l'a révélé.



**PAR Romain Amiot**, chargé de recherche au CNRS, au laboratoire de géologie de Lyon.

**L**e tyrannosaure, et les dinosaures de façon générale, avaient-ils le sang chaud ou le sang froid ? Autrement dit, produisaient-ils la chaleur interne de leur corps par leur métabolisme seulement ? Ou se chauffaient-ils en utilisant leur environnement, tels les lézards, tombant dans l'apathie dès que les températures extérieures devenaient trop basses ?

En apparence anecdotique, cette question est d'une importance fondamentale pour comprendre le fonctionnement des écosystèmes terrestres du Mésozoïque. Elle a longtemps été débattue. Certains paléontologues arguaient en faveur de dinosaures à sang chaud, en se fondant sur des similitudes entre ceux-ci et les mammifères ou les oiseaux actuels. D'autres défendaient la seconde hypothèse, les reptiles géants devant partager la majeure partie des caractéristiques

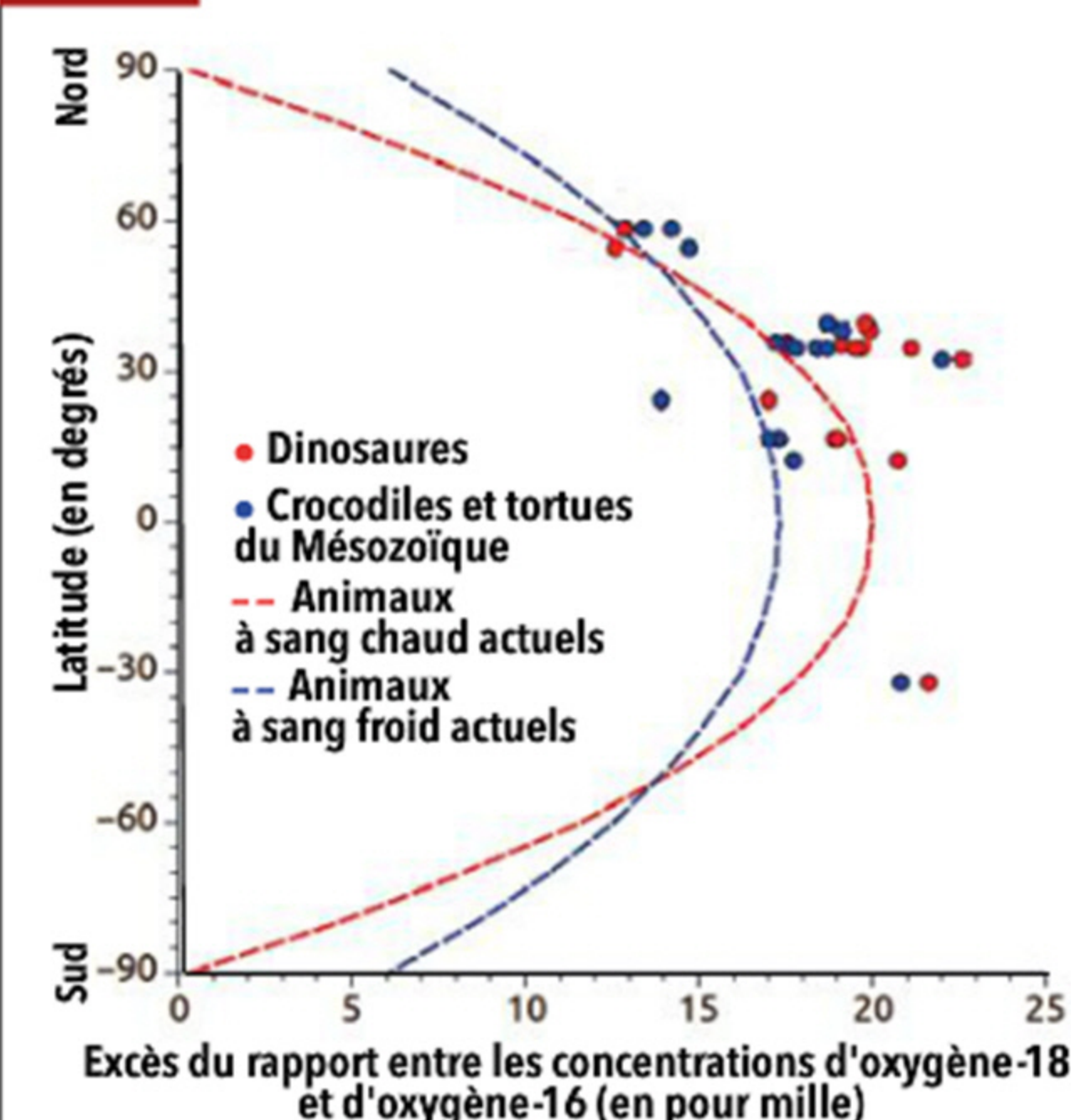
de leurs cousins d'aujourd'hui. Finalement, des analyses chimiques particulières ont permis de répondre sans ambiguïté.

**Chaleur minimale.** Comme tous les êtres vivants, les dinosaures devaient maintenir leur corps à une température minimale afin que l'activité de leurs cellules atteigne un niveau suffisant. Deux adaptations principales permettant de satisfaire cette contrainte sont apparues au cours de l'histoire évolutive des vertébrés. La plus simple d'entre elles consiste à capter la chaleur de l'environnement immédiat, par exemple le rayonnement solaire, afin de monter sa température corporelle : c'est l'ectothermie. Les reptiles actuels, tels les crocodiles, les tortues, les lézards et les serpents, sont ectothermes, communément qualifiés d'animaux à sang froid.

À l'inverse, la stratégie la plus coûteuse en énergie pour monter la température corporelle consiste à produire la totalité de la chaleur interne par l'activité métabolique de chaque cellule : c'est l'endothermie. Aujourd'hui, les mammifères et les oiseaux sont endothermes, ou à sang chaud. Cette caractéristique permet aux animaux de maintenir une activité soutenue toute l'année dans des environnements rigoureux inaccessibles aux ectothermes, telles les hautes latitudes et les hautes altitudes. Tout comme une voiture a besoin de carburant pour rouler, l'endothermie nécessite d'ingérer une grande quantité de nourriture afin d'assurer la production de chaleur.

L'incertitude quant à l'ectothermie ou à l'endothermie des dinosaures était liée aux arguments contradictoires utilisés par les scientifiques. D'une part, leur anatomie et leur mode de reproduction typiquement reptiliennes suggéraient qu'ils étaient ectothermes. D'autre part, la découverte de dinosaures dans des régions polaires dépourvues d'autres reptiles, ainsi que

**Fig.1 Comparaison de température corporelle**





les similitudes de leur microstructure osseuse avec les mammifères et les oiseaux arguaient plutôt en faveur de l'endothermie.

On en était là quand le développement d'une discipline nouvelle, la « géochimie isotopique », a donné un nouvel intérêt à la question. Celle-ci s'appuie sur le fait que les éléments chimiques existent pour la plupart sous plusieurs formes stables, qui ne diffèrent que par le nombre de neutrons\* que contient leur noyau : leurs isotopes. Les propriétés chimiques de ces isotopes sont quasi identiques, à quelques détails près, dus au fait qu'ils ont des masses légèrement différentes. Ainsi, l'oxygène, caractérisé par les 8 protons de son noyau, a 3 isotopes stables, l'oxygène-16, l'oxygène-17 et l'oxygène-18, qui contiennent respectivement 8, 9 et 10 neutrons. L'oxygène-16 est de loin le plus abondant (99,7 %), suivi de l'oxygène-18 (0,2 %). Dans les années 1950, des géochimistes ont déterminé que, dans divers minéraux, les quantités relatives d'oxygène-18 et d'oxygène-16 dépendent de leur température de formation [1].

**Température de formation.** Des paléontologues ont alors imaginé que l'on pourrait, de cette façon, déterminer la température de formation des dents et des os des dinosaures. Ceux-ci sont en effet constitués par un minéral appelé bioapatite, préservé au cours de la fossilisation. Comme l'apatite de l'os et de la dent minéralise au sein de l'animal, leur température de formation correspond à la température corporelle.

En 1994, Reese Barrick et William Showers, de l'université de Caroline du Nord, aux États-Unis, ont pensé que le corps d'un animal ectotherme est soumis à des différences locales de températures. La température de sa cavité viscérale, où l'essentiel de la chaleur est produit et conservée, est



**Cette dent de *Tyrannosaurus rex* contient de l'apatite, minéral qui s'est formé du vivant de l'animal. Son analyse, comparée à celle d'autres espèces vivant dans le même environnement à la même époque, renseigne sur la physiologie de l'espèce.**

généralement plus élevée que celle des extrémités comme les membres et la queue, plus exposés aux températures extérieures. À l'opposé, un animal endotherme, dont la production de chaleur est assurée par l'activité métabolique de toutes ses cellules a une température corporelle uniforme, ou presque, du centre aux extrémités.

Lors de la croissance osseuse, les différences de températures locales subies par un ectotherme devraient donc se traduire par des écarts de concentration relative de l'oxygène-16 et de l'oxygène-18 dans l'apatite, en fonction de leur éloignement du tronc de l'animal. Pour un endotherme, au contraire, on devrait observer des concentrations relatives homogènes dans tout son squelette.

Les chercheurs ont alors effectué une série de mesures des concentrations en oxygène-16 et en oxygène-18 de divers os d'un même dinosaure, pour plusieurs espèces dont *Tyrannosaurus rex*. Ils ont observé de très faibles écarts entre les différents os, qui semblaient indiquer que les dinosaures analysés possédaient une température >>>

**\* LES NEUTRONS** sont, avec les protons, les particules constitutives du noyau des atomes.

## L'essentiel

➤ CERTAINS PALÉONTOLOGUES considéraient que les dinosaures, apparentés aux reptiles, étaient à sang froid.

➤ CERTAINES CARACTÉRISTIQUES anatomiques les rapprochaient toutefois des oiseaux et des mammifères, à sang chaud.

➤ C'EST L'ANALYSE CHIMIQUE de l'oxygène dans leurs dents qui a permis de trancher.



## Les dinosaures avaient le sang chaud

>>> relativement constante au sein de leur corps, comme les endothermes actuels [2].

Ces conclusions ont toutefois été très critiquées. Si les dinosaures analysés avaient vécu sous des climats chauds et à saisons peu contrastées, avançaient d'autres équipes, les différentes parties de leur corps n'auraient subi que de très faibles différences de température, qu'ils aient été ectothermes ou endothermes. En 2001, la publication d'une étude montrant chez des alligators actuels (des ectothermes) des écarts de concentration relative en oxygène-18 similaires à ceux mesurés sur les os de *Tyrannosaurus rex* a confirmé les limites de cette méthode.

**Preuves dentaires.** Toutefois, en 2000, les Américains Henry Fricke, alors à l'institution Carnegie de Washington, et Raymond Rogers, du Macalester College, tous deux aux États-Unis, ont proposé une autre approche méthodologique pour aborder cette question [3]. Avec Éric Buffetaut, de l'École normale supérieure, à Paris, Christophe Lécuyer, de l'École normale supérieure de Lyon et Frédéric Fluteau, de l'Institut de physique du globe de Paris, nous l'avons reprise et étendue. Nous avons comparé les valeurs moyennes de la concentration relative en oxygène-18 de dents de dinosaures avec celles de dents ou d'os d'animaux contemporains ayant des thermophysologies connues et ayant vécu à différentes latitudes. En fonction de la latitude, donc du climat sous lequel ils vivaient, endothermes et ectothermes avaient dû posséder des températures corporelles différentes, qui se refléteraient sur ces valeurs.

En comparant les concentrations relatives en oxygène-18 des quatre groupes de dinosaures (théropodes, sauropodes, ornithomimes et céraposés) avec celles de crocodiles et de tortues (des ectothermes) ayant coexisté avec eux, nous avons effectivement observé des écarts entre

dinosaures d'une part, et tortues et crocodiles d'autre part, similaires à ceux que l'on observe aujourd'hui entre des animaux à sang froid et des animaux à sang chaud. Nous avons ainsi montré de façon concluante que les dinosaures étaient à sang chaud [4] [fig. 1].

**Énormes besoins alimentaires.** Un tel résultat a bouleversé un grand nombre d'idées reçues concernant le Mésozoïque et les dinosaures. Par exemple, il remet en question l'idée, fondée sur la supposée ectothermie des dinosaures, que les relations trophiques et la structuration des communautés vivantes au Mésozoïque étaient simples, avec en particulier peu de compétition pour les ressources et de faibles besoins alimentaires. Compte tenu des besoins alimentaires énormes des dinosaures endothermes, ces relations devaient en fait être bien plus complexes, à l'image de ce que l'on observe aujourd'hui avec les mammifères dont les distributions et les abondances sur les continents traduisent le fragile équilibre qu'ils entretiennent entre la disponibilité des ressources alimentaires et la croissance de leurs populations.

Ce résultat a permis également d'aborder l'extinction des dinosaures sous une perspective nouvelle. Étant à sang chaud, il est peu probable qu'une dégradation climatique ait été directement à l'origine de leur disparition, puisque leur physiologie leur permettait de vivre à toutes les latitudes et sous tout type de climats. Les causes de leur disparition seraient donc à rechercher ailleurs.

L'apparition de l'endothermie dans la lignée des dinosaures reste toutefois encore à élucider. L'un de leurs ancêtres directs de la fin du Paléozoïque était-il déjà endotherme ? Ou cette caractéristique est-elle apparue plus tard, indépendamment dans les différents groupes de dinosaures ? Plusieurs équipes internationales tentent aujourd'hui d'y répondre. ■

[1] T. Tortosa et al., *Principes de paléontologie*, Dunod, 2013 ; R. Amiot, in *La Science au présent*, Encyclopaedia Universalis, 2010, p. 142.

[2] R. E. Barrick et W. J. Showers, *Science*, 265, 222, 1994.

[3] H. C. Fricke et R. R. Rogers, *Geology*, 28, 799, 2000.

[4] R. Amiot et al., *Earth and Planetary Science Letters*, 246, 41, 2006.

## Pour en savoir plus

### Livres et revues

> Jean Le Lœuff, *Tyrannosaurus et les mondes perdus*, Éditions du Saurope, 2012.

> Ronan Allain, *Histoire des dinosaures*, Librairie académique Perrin, 2012.

> Brett-Surman, Michael K., Thomas R. Holtz, Jr., et James O. Farlow, *The Complete Dinosaur*, Indiana University Press, 2012.

> Stephen L. Brusatte, *Dinosaur Paleontology*, Wiley-Blackwell, 2012.

> Éric Buffetaut, *Les dinosaures sont-ils un échec de l'évolution ?*, Le Pommier, 2008.

> Thomas R. Holtz, Jr., *Dinosaurs: The Most Complete Up-to-Date Encyclopedia for Dinosaur*

*Lovers of All Ages*, Random House, 2007.

> Éric Buffetaut, *Les dinosaures*, Le Cavalier Bleu, 2006.

### Sur le web

> [www.dinosauria.org](http://www.dinosauria.org)

Le musée des dinosaures d'Espéraza, dans l'Aude.

> <http://bit.ly/TrexCapSciences>  
Exposition : T.Rex, secrets de famille d'un dinosaure. Jusqu'au 4 janvier 2015, Cap Sciences, Bordeaux.



Le Monde & **LA Recherche**  
présentent

DÉBATS  
EXPOS - FILMS  
RENCONTRES

ENTRÉE  
LIBRE



# CULTIVONS LE FUTUR

LE JEUDI 22 MAI 2014

AU **Cnam**

(Conservatoire national des arts et métiers)

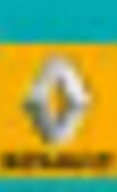
**FORUM**

SCIENCE, RECHERCHE & SOCIÉTÉ

PROGRAMME ET INSCRIPTION SUR [WWW.FORUM-SRS.COM](http://WWW.FORUM-SRS.COM)

Live tweet #forumsrs avec Indesciences

En partenariat avec :



Avec le soutien de :





# PROGRAMME DU FORUM

9H30-11H

11H15-12H30

12H30-13H

14H-15H

## PLÉNIÈRE D'OUVERTURE

### SCIENCE MONDIALISÉE, SCIENCE SANS FRONTIÈRES

Aline Richard, *La Recherche*  
Didier Pourquery, *Le Monde*

#### AVEC

- FRÉDÉRIC BORDRY, chef du département Technologie du Cern
- JEAN-PIERRE BOURGUIGNON, président du Conseil européen de la recherche
- CYNTHIA FLEURY, philosophe
- HERVÉ LE BRAS, démographe
- BERNADETTE MURGUE, Institut de microbiologie et maladies infectieuses

## MASTERCLASS

### JE NE SUIS PAS SCIENTIFIQUE MAIS...

GEORGES APERGHIS, compositeur et  
NICOLAS OBIN, chercheur Ircam

#### ENVIRONNEMENT

### IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DE L'ÉNERGIE : UNE NOTION EN CONSTANTE ÉVOLUTION

Franck Barnu, *La Recherche*

#### AVEC

- JEAN-FRANÇOIS MINSTER, directeur scientifique, Total
- FRANÇOIS MOISAN, directeur scientifique, Ademe
- BERNARD SALHA, directeur R&D, EDF
- OLIVIER APPERT, président, IFP Énergies nouvelles
- BERNARD TARDIEU, président de la commission Énergie et Changement climatique à l'Académie des technologies

#### RECHERCHE

### LES PATIENTS, EXPERTS MÉDICAUX

Pascale Santi, *Le Monde*

#### AVEC

- YVANIE CAILLÉ, fondatrice de l'association Renaloo
- CLAIRE COMPAGNON, représentante des usagers à l'hôpital européen Georges-Pompidou à Paris
- ALICE RIVIÈRES, cofondatrice du collectif ding ding dong

#### DOCUMENTAIRE SCIENTIFIQUE

### CONTRÔLER LE GÉNOME : UNE AMBITION SANS LIMITES ?

#### SANTÉ

### INÉGALITÉS FACE AU CANCER : QUE DIT LA SCIENCE ?

Jean-Philippe Braly, *La Recherche*

#### AVEC

- FABIEN CALVO, directeur général adjoint de l'Institut national du cancer (INCa)
- GWENN MENVIELLE, épidémiologiste à l'Inserm
- EMMANUEL JAMMES, délégué Société et Politique à la Ligue nationale contre le cancer
- DOMINIQUE STOPPA-LYONNET, directeur service de Génétique de l'Institut Curie

#### SOCIÉTÉ

### LES MOOC, PHÉNOMÈNE DE MODE OU VÉRITABLE ACCÈS AU SAVOIR ?

Sophie Coisne, *La Recherche*

#### AVEC

- FRANÇOIS TADDEI, directeur du Centre de recherches interdisciplinaires (sous réserve)
- MATHIEU CISEL, doctorant sur les MOOC, École Centrale de Lille
- FRANCK PACARD, directeur de l'enseignement et de la recherche, École Polytechnique (sous-réserve)

## REMISE DES PRIX

### CONCOURS GÉNÉRATION DÉVELOPPEMENT DURABLE

## ALLOCUTION DE BENOÎT HAMON MINISTRE DE L'ÉDUCATION NATIONALE, DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE

(sous réserve)

## PLÉNIÈRE D'OUVERTURE

### SONDAGE IPSOS : LES JEUNES ET LA SCIENCE

Aline Richard, *La Recherche*  
Hervé Morin, *Le Monde*  
Restitution du sondage par BRICE TEINTURIER, directeur général délégué Ipsos (sous-réserve)

#### AVEC

- AGNÈS BUZIN, présidente de l'INCa
- THIERRY GALLI, directeur de Recherche Inserm, Institut Jacques-Monod
- PHILIPPE KOURILSKY, membre de l'Académie des sciences et professeur au Collège de France
- FRANÇOIS TADDEI, directeur du Centre de recherches interdisciplinaires (sous réserve)
- JEAN-DIDIER VINCENT, neurobiologiste, membre de l'Académie de médecine et de l'Académie des sciences

**PARCOURS SCIENTIFIQUE : EXPOSITIONS, FILMS, ATELIERS, DOCUMENTAIRES... UNE AUTRE FAÇON DE DÉCOUVRIR LES SCIENCES**

- Showroom Serious Games scientifiques
- Exposition sur les grilles du Cnam
- Les objets connectés de l'e-santé
- Librairie scientifique éphémère



15H15-16H15

16H-16H30

16H45-18H

18H-19H15

**MASTERCLASS**

ÉTIENNE KLEIN, physicien

**MASTERCLASS**

JE NE SUIS PAS SCIENTIFIQUE MAIS...

PATRICK TRESSET, artiste et ingénieur

**ENVIRONNEMENT**

**TRANSPORTS : COMMENT RÉENCHANTER LA MOBILITÉ ?**

Jean-Philippe Braly, *La Recherche*

**AVEC**

- RÉMI BASTIEN, directeur Recherche & Innovation chez Renault
- DOMINIQUE LAOUSSE, responsable du groupe Innovation et Prospective à la SNCF

**MASTERCLASS DE CLÔTURE**

**HIGH-TECH**

**OBJETS CONNECTÉS : POUR UNE MEILLEURE SANTÉ ?**

Vincent Glavieux, *La Recherche*

**AVEC**

- NICOLAS DEMASSIEUX, directeur d'Orange Labs Recherche
- STÉPHANE DARRACQ, PDG de Makazi Group

**NEURO-PSYCHO**

**LA SCIENCE DES RÊVES**

Sandrine Cabut, *Le Monde*

**AVEC**

- Professeur ISABELLE ARNULF, chercheur neurologue à la Pitié-Salpêtrière à Paris
- Docteur FABIAN GUENOLE, service de Psychiatrie de l'enfant et de l'adolescent, CHU de Caen
- PERRINE RUBY, chargée de recherche, Centre de recherche en neurosciences de Lyon

**SOCIÉTÉ**

**CONTROVERSES SCIENTIFIQUES : PEUT-ON FAIRE CONFIANCE AUX CHERCHEURS ?**

Hélène Lemeur, *La Recherche*

**AVEC**

- FRÉDÉRIQUE AÏT-TOUATI, maître de conférence au John's College d'Oxford et professeur affiliée à Sciences Po Paris
- GRÉGOIRE MOLINATTI, sociologue des sciences, maître de conférence à l'université de Montpellier 2
- STÉPHAN SCHUMACHER, ingénieur géologue de formation, chef du service Colis et Matériaux, Andra

**SANTÉ**

**PERTURBATEURS ENDOCRINIENS : COMMENT S'EN PROTÉGER ?**

Cécile Klingler, *La Recherche*

**AVEC**

- FRANÇOIS BUSQUET, CAAT Europe Policy Coordinator (Center for Alternatives to Animal Testing)
- DOMINIQUE GOMBERT, directeur de l'Évaluation des risques à l'Anses
- Dr LUC MULTIGNER, directeur de Recherche, Inserm

**SOCIÉTÉ**

**QUEL MODE DE PARTAGE DES SAVOIRS ?**

Hervé Morin, *Le Monde*

**AVEC**

- JEAN FRANK CAVANAGH, directeur des Relations extérieures, Reed Elsevier
- GHISLAINE CHARTRON, professeur, chaire d'Ingénierie documentaire, Cnam
- Dr BRUNO MOULIA, professeur de Recherches MECA group

**ENVIRONNEMENT**

**LE CHANGEMENT CLIMATIQUE : COMMENT S'Y ADAPTER ?**

Marie-Laure Théodule, *La Recherche*

**AVEC**

- VAZKEN ANDRÉASSIAN, hydrologue à Irstea
- HERVÉ LE TREUT, directeur de Recherche, Laboratoire de Météorologie dynamique du CNRS
- VALÉRY MASSON, chercheur à Météo-France, équipe Ville et Climat

**DOCUMENTAIRE SCIENTIFIQUE ARTE**

**MÉTHANE : RÊVE OU CAUCHEMAR ?**

**MATHS**

**LE HASARD, UNE NÉCESSITÉ**

David Larousserie, *Le Monde*

**AVEC**

- JEAN-PAUL DELAHAYE, mathématicien
- GUÉNAËL RENAULT, informaticien
- GRÉGOIRE RIBORDY, cofondateur d'Idquantique

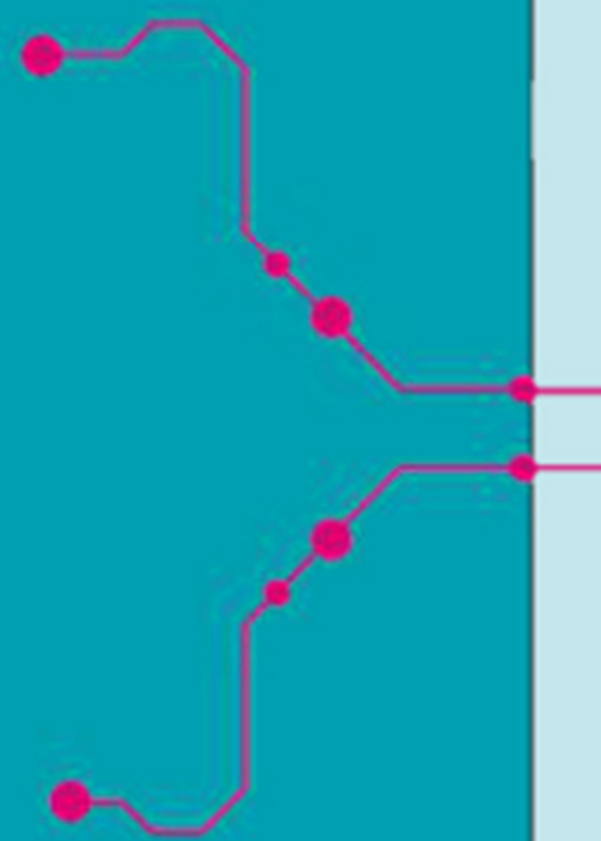
**SANTÉ**

**HABITUDES ALIMENTAIRES ET RECHERCHES MÉDICALES : QUELLES SOLUTIONS CONTRE L'OBÉSITÉ ?**

Rémi Canali, *La Recherche*

**AVEC**

- CHRISTINE CHERBUT, directrice scientifique Alimentation de l'Inra
- KARINE CLÉMENT, experte en obésité massive et précoce, en particulier génétique, pôle Endocrinologie à l'hôpital de la Pitié-Salpêtrière





# L'incroyable fraude de Diederik Stapel

Un psychologue universitaire néerlandais, chéri des médias pour ses travaux spectaculaires, trichait depuis le début de sa carrière. Une affaire qui jette le doute sur l'ensemble de la psychologie sociale.

PAR Jean-Philippe Braly, journaliste.

## L'essentiel

➤ **PSYCHOLOGUE SOCIAL** renommé, Diederik Stapel avait truqué au moins 55 de ses publications.

➤ **COAUTEURS, RELECTEURS** et revues scientifiques sont également accusés de négligence.

➤ **PLUS LARGEMENT**, la psychologie sociale devra réviser ses pratiques.

« **U**n environnement mal entretenu génère des comportements racistes ». « Les consommateurs de viande sont moins sociables et plus égoïstes ». Ces deux résultats annoncés en 2011 sont emblématiques des travaux du psychologue Diederik Stapel, alors à l'université de Tilburg, aux Pays-Bas [1]. Accrocheurs, simples à expliquer, renforçant certaines idées préconçues sur des sujets de société, publiés dans des revues scientifiques réputées... un grand nombre d'entre eux a été relayé par la presse grand public, *La Recherche* y compris [2].

Problème : tout était faux. Diederik Stapel avait truqué les données d'au moins 55 de ses publications ! Lui qui, ironie du sort, étudiait aussi comment le pouvoir influence la morale avait une technique bien au point. Mais il a aussi bénéficié de la complicité, au moins passive, de ses coauteurs, et de toute la chaîne de publication des revues scientifiques. Au-delà du cas particulier, cette affaire jette le doute sur la fiabilité des résultats de toute la psychologie sociale, et pas seulement aux Pays-Bas.

Revenons à l'été 2011. Diederik Stapel est alors l'étoile montante de sa discipline. À seulement 44 ans, il jouit d'une renommée internationale avec déjà une centaine d'articles scientifiques publiés. Ce succès l'a d'ailleurs propulsé doyen de l'école des sciences sociales et comportementales de l'université de Tilburg.

Le 27 août, tout bascule. Ce jour-là, prenant leur courage à deux mains, trois étudiants frappent à la porte du responsable du département de psychologie sociale : ils ont repéré des choses étranges dans certaines données publiées

par Diederik Stapel, et le suspectent de fraude. Face à leurs preuves bien étayées, ce dernier avoue rapidement que certaines de ses publications sont truquées.

Le 7 septembre, l'université de Tilburg le suspend de ses fonctions. Les trois universités où il a travaillé depuis le début de sa carrière – à Tilburg, Groningue et Amsterdam – mettent chacune sur pied un comité d'investigation. Le 10 novembre 2011, Diederik Stapel rend son doctorat.

**Dix thèses éclaboussées.** Un an plus tard, le 28 novembre 2012, les trois comités publient leur verdict. L'ampleur de la fraude est stupéfiante : 55 études de Diederik Stapel, publiées sur plus d'une décennie, sont déclarées frauduleuses sans aucun doute possible ! Onze autres sont fortement suspectées de l'être aussi, mais les données que les comités ont pu récolter ne sont pas suffisantes pour qu'ils puissent l'affirmer avec certitude. Pire encore, les thèses de dix étudiants que Diederik Stapel avait supervisées sont entachées par cette fraude. « *Certains coauteurs ont perdu la plupart de leurs publications, c'est un réel désastre, notamment en début de carrière* », commente Willem Levelt, de l'institut Max Planck de psycholinguistique de Nimègue, aux Pays-Bas, qui a coordonné l'enquête.

Comment Diederik Stapel a-t-il pu tromper son monde si longtemps ? Selon le rapport d'enquête, il avait mis en place une tactique bien rodée. La plupart du temps, avec les futurs coauteurs de la publication, il concevait le protocole expérimental nécessaire pour tester l'hypothèse souhaitée. Mais ensuite, il disait à ses collègues qu'il allait faire réaliser les expériences dans une autre université





**Les travaux de psychologie sociale de Diederik Stapel (ici en 2012), simples, concis et touchant des questions de société, avaient souvent les honneurs de la presse. Quand une enquête établit, en octobre 2011, que 55 au moins de ses articles étaient frauduleux, la disgrâce de l'universitaire fut largement médiatisée.**

ou un autre institut avec lesquels il prétendait avoir des accords spéciaux. Quelques semaines plus tard, il revenait vers eux avec un fichier de données prêtes à l'emploi... qu'il avait en fait inventées de toutes pièces !

À propos de ces coauteurs, chercheurs confirmés ou débutants, le rapport est catégorique : « *Les comités n'ont trouvé aucune preuve que les coauteurs auraient délibérément collaboré à la falsification des données avec M. Stapel.* » Mais tout de même... Pourquoi n'ont-ils pas exigé que Diederik Stapel leur fournisse les données brutes avant de cosigner les publications ?

Plusieurs d'entre eux sont en poste dans différentes universités néerlandaises. Ils n'ont pas donné suite aux demandes d'entretiens. Seul Willem Kommen, aujourd'hui à la retraite, ancien professeur à l'université d'Amsterdam, qui a dirigé le doctorat de Diederik Stapel et publié avec lui, a accepté de répondre. « *Se référer aux données brutes ne faisait pas partie de la pratique scientifique. De plus, les données brutes ne sont qu'une première étape, elles ne garantissent pas l'absence de fraude, car elles aussi peuvent être truquées* », explique-t-il. Le rapport d'enquête révèle que certains collabo-

rateurs de Diederik Stapel lui avaient quand même demandé ces données brutes, mais que ce dernier avait trouvé des excuses... Certains « importuns » ont même déclaré avoir été insultés et menacés !

**Archives disparues.** Concernant le doctorat que Diederik Stapel avait soutenu avec succès en 1997, les archives ayant été détruites, le comité d'enquête n'a pas pu déterminer s'il reposait également sur des données inventées. La question de l'archivage est en effet cruciale. « *Pour de très nombreuses publications de Diederik Stapel, les comités*

*d'investigation n'ont pas pu statuer sur leur caractère frauduleux ou pas, car ils n'ont tout simplement pas retrouvé les archives*, déplore Hervé Maisonneuve, de l'université Claude-Bernard Lyon-I, spécialiste des questions de fraudes scientifiques. À la suite de cette affaire, l'Académie Royale hollandaise des arts et des sciences a pointé le problème du mauvais archivage dans les universités. C'est un message fort pour le monde académique. »

S'il n'y avait que cela... Le cas Diederik Stapel met en exergue des dysfonctionnements encore plus graves. En se plongeant dans les publications, >>>

## Une carrière fulgurante

> **1997 : Diederik Stapel obtient son doctorat en psychologie sociale à l'université d'Amsterdam.**

> **2000 : il devient professeur à l'université de Groningue.**

> **2006 : il rejoint l'université de Tilburg pour diriger l'Institut de recherche en économie comportementale.**

> **2010 : il est nommé doyen de l'école de sciences sociales et comportementales de l'université de Tilburg.**

> **7 SEPTEMBRE 2011 : l'université de Tilburg le suspend de ses fonctions.**

> **28 NOVEMBRE 2012 : 55 de ses publications (sur plus d'une centaine) sont déclarées frauduleuses.**

> **2014 : à 47 ans, il est à la recherche d'un emploi.**



# L'incroyable fraude de Diederik Stapel

» les enquêteurs ont facilement découvert des irrégularités et des inexactitudes statistiques, des données extrêmement improbables, des expériences quasiment infaisables en pratique, etc.

Ils s'étonnent aussi du fait que les hypothèses étaient presque toujours confirmées, et évoquent même « *des données et des résultats trop beaux pour être vrais* ». Logiquement, les coauteurs et les relecteurs des revues dans lesquelles les articles ont été publiés – parmi lesquelles des revues internationales de premier plan – sont pointés du doigt. Selon les enquêteurs, il est presque inconcevable que tous ces spécialistes n'aient rien détecté. Pire, le rapport révèle que les relecteurs ont souvent encouragé des pratiques irrégulières. Par exemple en demandant

aux auteurs de passer sous silence certains résultats « indésirables ».

Quant aux éditeurs des revues, l'enquête montre qu'ils ont souvent plaidé en faveur de ces sujets intéressants, élégants, concis et irrésistibles, de nature à être largement repris dans la presse. Et Willem Levelt de conclure impi-toyablement que « *de la base jusqu'au sommet, on a négligé les règles fondamentales de la science et les obligations méthodologiques* ». L'autocritique semble bien tardive.

**Données non communiquées.** La fraude de Diederik Stapel a ainsi fait des dégâts bien au-delà des trois universités néerlandaises où il a sévi. C'est le sérieux même de la psychologie sociale qui s'est trouvée mis en doute. Et elle a rendu plus audibles des critiques croissantes sur sa

culture du secret et ses pratiques douteuses, apparemment monnaie courante.

Fin 2011, Jelte Wicherts, statisticien à l'université de Tilburg, a révélé les résultats édifiants d'une étude menée sur les auteurs de 49 articles publiés dans deux grandes revues de psychologie [3]. « *Seuls 21 ont accepté de partager certaines de leurs données, douze ont promis de les transmettre sans finalement le faire, treize n'ont pas répondu à notre demande malgré deux rappels, et trois ont carrément refusé prétextant la perte de données ou un manque de temps* », indique-t-il dans son étude. Et comme par hasard, Jelte Wicherts a constaté que les auteurs les plus réticents à fournir leurs données sont ceux dont les articles présentaient le plus d'erreurs statistiques.

Autre critique majeure : les expériences sont trop rarement reproduites pour confirmer les résultats. La faute aux éditeurs qui veulent des sujets neufs et surprenants ? En 2013, l'équipe de David Shanks, du University College de Londres, au Royaume-Uni, a voulu reproduire une étude néerlandaise qui avait conclu que penser à un professeur avant un test d'intelligence donne de meilleurs résultats que de penser à des hooligans. Malgré neuf tentatives, son équipe n'a jamais obtenu ce résultat [4].

Le problème ne concerne pas que les Pays-Bas. Quelques mois plus tôt, avec des collègues, Stéphane Doyen, de l'université libre de Bruxelles, en Belgique, a voulu reproduire une expérience classique de John Bargh, de l'université Yale, aux États-Unis. Elle concluait que les gens marchent plus lentement après avoir été inconsciemment soumis à des mots relatifs à la vieillesse. Pas moyen non plus d'obtenir à nouveau ce résultat [5].

En outre, la psychologie sociale n'est pas la seule à engendrer de la suspicion. Dès 2005, John Ioannidis, épidémiologiste à l'université Stanford, aux États-Unis, affirmait que, du point de vue de la stricte logique statistique, la plupart des résultats publiés dans le domaine de la biomédecine sont de faux positifs [6]. En cause : petits échantillons,

## Éviter une nouvelle affaire

Après l'onde de choc produite par l'affaire Diederik Stapel, les chercheurs en psychologie sociale tentent de redorer le blason de leur discipline. À l'université de Charlottesville, aux États-Unis, Brian Nosek coordonne par exemple un projet ambitieux visant à reproduire systématiquement les expériences récemment publiées dans les grandes revues. Il fédère déjà une cinquantaine de chercheurs. « *Nous en sommes déjà à 80 répliques, et nous espérons en avoir vingt de plus*

*en avril, indique-t-il. Nous disposerons probablement des résultats au printemps.* » Le prix Nobel d'économie Daniel Kahneman, de l'université de Princeton, prône carrément une association entre laboratoires pour que chacun réplique systématiquement les expériences du voisin. Mais pour Uri Simonsohn, de l'université de Pennsylvanie, aux États-Unis : « *La psychologie sociale ne dispose pas de suffisamment de moyens de défense pour prévenir la fraude.* »

Voilà pourquoi il a développé une méthode statistique pour repérer les publications frauduleuses. Capable de détecter les séries statistiques suspectes, elle a été utilisée pour confondre Diederik Stapel. Depuis, la méthode du « détective Simonsohn » a jeté le doute sur le travail de plusieurs autres psychologues sociaux, tels Dirk Smeesters de l'université Erasme de Rotterdam, aux Pays-Bas, et Lawrence Sanna, de l'université du Michigan, aux États-Unis. Tous deux ont démissionné et certains de leurs articles ont été rétractés.





**Selon une étude de Diederik Stapel publiée en 2011, un environnement dégradé aurait augmenté la méfiance, éveillé les préjugés racistes et incité à garder ses distances (1). Le ramassage des ordures et le nettoyage du lieu auraient fait tomber les barrières (2). Toutefois, aucune donnée ne justifiait ce résultat.** © SIEGWART LINDENBERG

effets de faible ampleur, processus de recherches trop flexibles, etc. Et pas assez de reproduction des études pour confirmer les résultats.

**Drogué au succès.** Pour Hervé Maisonneuve, le système actuel de la recherche est aussi en cause. «*Il pousse les chercheurs à publier tous azimuts pour financer leurs recherches et pro-*

*mouvoir leur carrière. C'est "publish or perish", comme disent les Anglo-Saxons. Autrement dit, publie ou crève !* » Cette analyse va dans le sens des explications fournies par Diederik Stapel, dans un livre autobiographique publié le jour même de la sortie du rapport d'enquête sur sa fraude [7] : «*Chercher, découvrir, publier, avoir du succès et être applaudi : j'étais devenu drogué à ce rythme* », écrit-il. Une spirale infernale qui favorise les publications aux résultats positifs accrocheurs dont Diederik Stapel s'était fait une spécialité, et surtout pas les résultats négatifs !

En passant en revue 4 600 études toutes disciplines confondues, Daniele Fanelli, de l'université de Montréal, au Canada, a ainsi montré que la proportion de résultats positifs a crû de plus de 22 % entre 1990 et 2007. Parallèlement, sur les dix dernières années, les rétractations ont été multipliées par dix alors que le nombre de publications n'a augmenté que de 44 %. Or, selon une analyse publiée dans les comptes rendus de l'Académie américaine des sciences, deux tiers des rétractations seraient consécutives à une fraude, soit dix fois plus que dans les années 1970.

**\*LES CONFÉRENCES TEDx** sont des franchises de la fondation américaine TED dont le sigle signifie technologie, divertissement, design.

Aujourd'hui Diederik Stapel est loin de tout cela. Il recherche du travail en tant que consultant, conférencier, coach... et même chauffeur ! Il écrit également des livres et des pièces de théâtre.

Il y a quelques mois aux Pays-Bas, il est revenu sur le devant de la scène pour une « conférence TEDx\* » surprenante, au cours de laquelle il a donné des conseils fondés sur ce que lui avait appris sa descente aux enfers. Cette conférence, dont les chemins de fer hollandais étaient partenaires, s'est déroulée à bord d'un train. Il aurait pu s'arrêter en gare d'Utrecht : Diederik Stapel avait fait croire qu'il y avait mené une étude « démontrant » que lorsque la gare était jonchée de déchets, les personnes de type européen s'asseyaient plus loin de personnes de couleur que lorsqu'elle était propre [8]. ■

- [1] <http://tinyurl.com/meat-eaters-DDN>
- [2] J. Abadie, *La Recherche*, p. 26, juin 2011.
- [3] J.M. Wicherts et al., *PLoS ONE*, 6, e26828, 2011.
- [4] D.R. Shanks et al., *PLoS ONE*, 8, e56515, 2013.
- [5] S. Doyen et al., *PLoS ONE*, 7, e29081, 2012.
- [6] J.P.A. Ioannidis, *PLoS Med*, 2, e124, 2005.
- [7] Diederik Stapel, *Ontsporing*, paru en novembre 2012 chez Prometheus.
- [8] D.A. Stapel et S. Lindenberg, *Science*, 332, 251, 2011.

#### Pour en savoir plus

➤ [www.commissielevelt.nl](http://www.commissielevelt.nl) L'avant-propos du rapport de la commission d'enquête sur la fraude de Diederik Stapel, avec des liens vers le rapport complet (en anglais et néerlandais).



**Willem Levelt, de l'institut Max Planck de psycholinguistique de Nimègue, a coordonné les trois enquêtes sur la part de fraude dans les travaux de Diederik Stapel.**



# Nos bactéries prédisent notre tour de taille

La composition de notre flore intestinale – ou microbiote – a un retentissement majeur sur l'obésité et les maladies associées. Tout indique qu'une faible diversité constitue un facteur de risque.



**PAR Karine Clément,** médecin et professeur de nutrition, qui dirige l'institut hospitalo-universitaire cardio-métabolisme et nutrition (ICAN), à l'hôpital de la Pitié-Salpêtrière, à Paris, ainsi qu'une équipe mixte Inserm-université Pierre-et-Marie-Curie. DR



**ET Joël Doré,** directeur scientifique du démonstrateur préindustriel MetaGenoPolis, qui dirige une équipe mixte INRA-AgroParisTech au sein de l'UMR Micalis, à l'INRA de Jouy-en-Josas. DR

## L'essentiel

➤ **CHEZ LA SOURIS ET L'HOMME** atteints d'obésité, la flore intestinale – ou microbiote – est déséquilibrée par rapport à un sujet mince.

➤ **LES DYSFONCTIONNEMENTS** métaboliques et inflammatoires associés à l'obésité sont plus marqués chez les personnes dont le microbiote a une faible diversité génétique.

➤ **CE PARAMÈTRE** peut désormais être considéré comme un facteur de risque.



Sur la paroi du côlon (photographiée par microscopie électronique à balayage, colorisée et grossie 4 500 fois), des regroupements de bactéries (brins jaunes) participent à la digestion. Elles dégradent les aliments et régulent leur absorption par l'organisme.

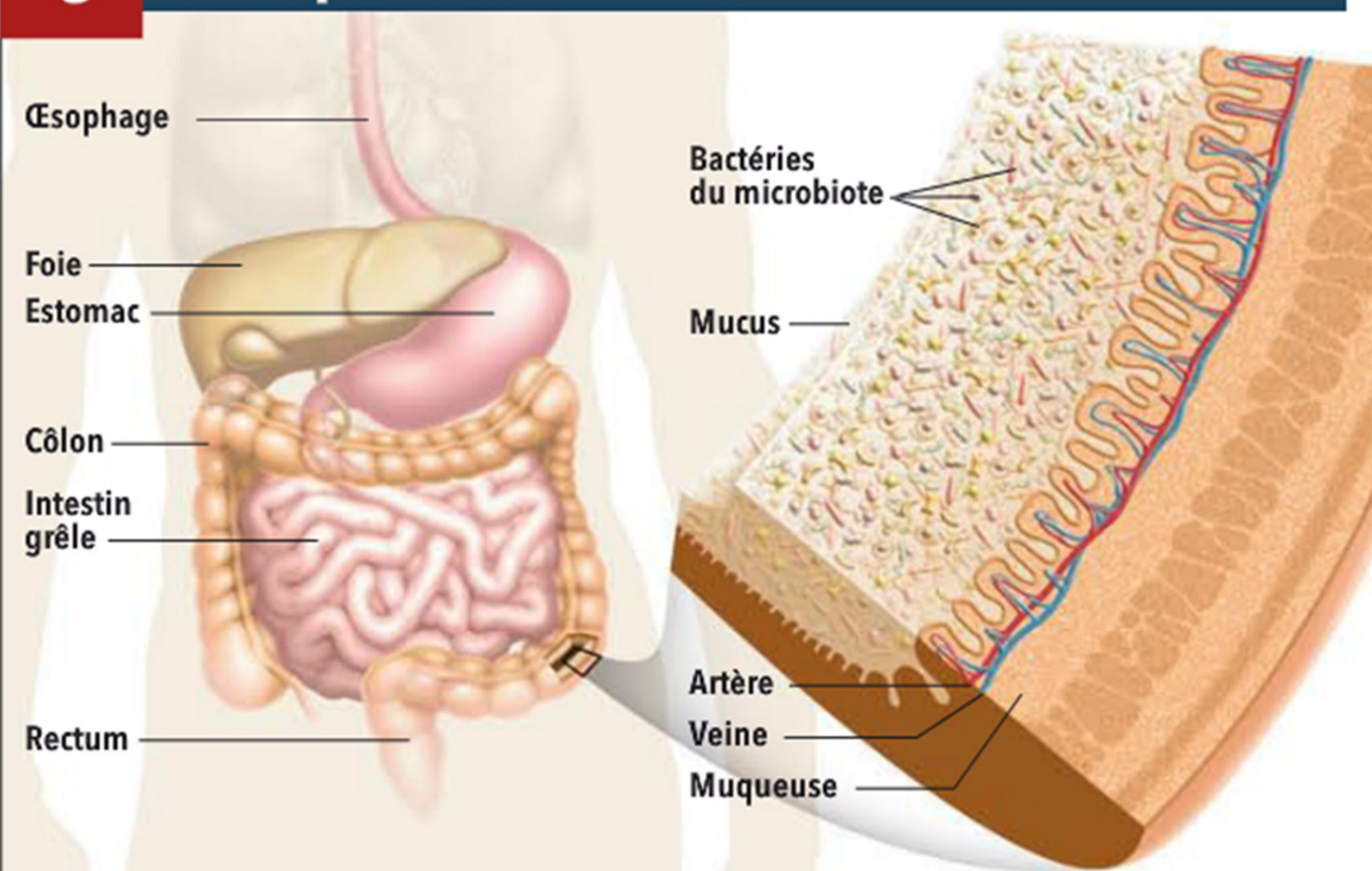


**L**es 10 000 milliards de cellules qui nous constituent sembleraient presque peu de chose, au regard de ce qu'abrite notre tube digestif : 100 000 milliards de bactéries, à la diversité foisonnante ! Notre flore intestinale, aujourd'hui appelée « microbiote », est à ce point indispensable au bon fonctionnement de notre organisme qu'on peut la considérer comme un organe à part entière. Qu'on en juge : le microbiote assure la dégradation des fibres dans le côlon, mais aussi la production de vitamines et d'acides gras à chaîne courte, absorbés puis utilisés comme source d'énergie par le corps. Il assure l'intégrité de la barrière intestinale, en modulant sa perméabilité ainsi que le renouvellement des cellules qui la constituent. Ou encore, il régule la maturation et la stimulation du système immunitaire.

Aussi indispensables que soient ces fonctions, il en est une autre qui, du fait de ses multiples implications en santé publique, attire d'autant plus l'attention : le rôle du microbiote dans l'obésité et les maladies métaboliques qui y sont associées, comme le diabète. Aux premières études, réalisées chez la souris au début des années 2000, ont très vite succédé d'autres, menées chez l'homme. Les plus récentes, dont les résultats ont été publiés en 2013, prouvent à quel point la composition du microbiote, en particulier un éventuel manque de diversité, est liée à l'obésité et à ses complications. Voilà qui ouvre de nouvelles pistes de recherche concernant cette maladie hétérogène dans ses manifestations cliniques, et qui fait intervenir des facteurs génétiques, des changements des modes de vie (sédentarité, alimentation riche) et des dialogues complexes entre les organes que sont le tissu adipeux, le foie, le muscle et le cerveau.

C'est en 2004 que Jeffrey Gordon et son équipe de l'université Washington, à Saint-Louis, aux États-Unis, ont réalisé chez la souris les premières expériences laissant suspecter un rôle du microbiote dans l'obésité. Ils ont transféré, à des souris dépourvues de microbiote, car nées et élevées en milieu stérile,

## Fig.1 Une épaisse couche de bactéries dans le côlon



**LE CÔLON** renferme la plus grande partie du microbiote intestinal. Les bactéries qui constituent ce dernier colonisent l'épaisse couche de mucus tapissant la muqueuse.

© INFOGRAPHIE SYLVIE DESSEST

rile, le microbiote de souris normales. En seulement deux semaines, cette colonisation a induit une augmentation de masse grasse et une résistance à l'insuline\*, alors que les animaux mangeaient moins après la « greffe » qu'avant. Face à ce constat, les biologistes américains ont avancé l'hypothèse suivante : le microbiote permettrait aux souris d'extraire davantage d'énergie à partir de l'alimentation, et favoriserait le stockage des graisses dans le tissu adipeux.

**Réserves énergétiques.** Deux ans plus tard, cette hypothèse est sortie renforcée par d'autres expériences de transfert : cette fois, des souris dépourvues de microbiote ont reçu celui de souris obèses [1]. Et elles sont devenues obèses à leur tour ! Chez la souris du moins, le microbiote aurait donc bien pour effet de réguler le stockage des réserves énergétiques chez l'hôte qu'il colonise.

Pour expliquer ce lien, la principale piste est celle du rôle potentiel

de différentes molécules produites par les bactéries. Par exemple, on sait depuis longtemps que des molécules issues de la fermentation d'aliments par les bactéries, par exemple le butyrate, atteignent d'autres organes – le foie et le tissu adipeux –, où ils facilitent le stockage d'énergie. Il se pourrait aussi que d'autres molécules plus complexes produites par certaines bactéries, par exemple les lipopolysaccharides, contribuent à l'obésité via leur accumulation dans la circulation sanguine de l'hôte. L'équipe de Patrice Cani et Nathalie Delzenne, de l'université catholique de Louvain, en Belgique, a en effet observé, chez les rongeurs en surpoids, des changements de perméabilité intestinale facilitant le passage des lipopolysaccharides dans le sang des animaux. Or, une fois dans le sang, ces molécules déclenchent un état inflammatoire dit de « bas grade », typique de l'obésité.

Mais toutes ces expériences ont été faites chez des souris. Qu'en est-il chez l'homme ? Comme la plus grande partie du microbiote fécal humain n'est pas cultivable en laboratoire, il a fallu développer différentes techniques moléculaires permettant d'identifier, à partir d'un simple prélèvement des fèces, les gènes bactériens >>>

\* **LA RÉSISTANCE À L'INSULINE** est le fait que les cellules sur lesquelles cette hormone est censée agir y deviennent insensibles. Au bout de quelques années, cela débouche souvent sur un diabète de type 2.



# Nos bactéries prédisent notre tour de taille

»» présents. Ces techniques ont été mises en œuvre en comparant des groupes de personnes obèses ou non obèses, ou bien lors d'interventions visant à entraîner une perte de poids et à améliorer les paramètres cardio-métaboliques : soit des interventions diététiques, soit des interventions beaucoup plus drastiques comme la chirurgie de l'obésité par « bypass » gastrique, qui consiste à réduire considérablement le volume de l'estomac.

## Usine de synthèse des protéines.

La première de ces techniques moléculaires est le séquençage du gène codant un ARN particulier : l'ARN ribosomal 16S. Cet ARN est constitutif des ribosomes, les usines de synthèse des protéines. Le gène qui le code est intéressant à double titre : sa séquence diffère suffisamment d'une espèce à une autre pour que l'on puisse les distinguer, mais il est aussi suffisamment proche pour que l'on puisse établir leur degré de parenté.

En 1999, l'un d'entre nous (Joël Doré), alors associé à des chercheurs de l'uni-

versité de Reading, au Royaume-Uni, a pour la première fois appliqué cette technique de séquençage à des échantillons de selles d'un homme adulte. Il est apparu que plus de 80 % des séquences d'ADN ribosomal 16S ainsi détectées n'étaient pas représentées dans les collections de souches bactériennes cultivables en laboratoire.

Puis, en 2006, l'équipe de Jeffrey Gordon a utilisé cette approche pour comparer le microbiote d'une douzaine d'hommes obèses avec celui d'hommes minces. Elle a alors observé que leur microbiote était déséquilibré : les proportions des différentes grandes lignées bactériennes n'étaient pas les mêmes [2]. Toutefois, lorsque les sujets obèses étaient astreints à une restriction calorique modérée, ce déséquilibre était rectifié.

Une étape supplémentaire a ensuite été franchie grâce à une autre technique : la métagénomique, c'est-à-dire le séquençage global de tout l'ADN d'un échantillon. Appliquée au tube digestif et aux fèces, cette technique permet d'accéder au « métagénome » d'un individu, soit l'ensemble des gènes des microbes dominants de son microbiote.

En 2010, le programme européen MetaHIT, coordonné par l'INRA, a produit le premier catalogue global de gènes établi à partir du métagénome intestinal de 124 individus européens [3]. Plus de 3,3 millions de gènes bactériens ont été décrits. Une observation importante

est qu'il existe un métagénome « cœur », c'est-à-dire qu'une grande partie des gènes bactériens sont partagés : 50 % des gènes du métagénome d'un individu peuvent être trouvés dans au moins 50 % du reste de la population étudiée.

**Trois types de microbiote.** L'étude des métagénomes a aussi mis en évidence une séparation de la population en trois groupes, correspondant à trois structures écologiques de leur microbiote. Ces structures ont été appelées « entérotypes » [4]. Deux d'entre eux sont dominés par un genre bactérien principal (*Bacteroides* pour l'un, *Prevotella* pour l'autre), tandis que le troisième est caractérisé par un ensemble de genres (*Ruminococcus*, *Subdoligranulum*, ou encore *Methanobrevibacter*).

Puis, une autre étude a indiqué que les entérotypes observés dans une cohorte nord-américaine seraient associés aux habitudes alimentaires au long cours. L'entérotipe *Bacteroides* était le plus répandu chez les personnes ayant une alimentation riche en protéines et en graisses animales, tandis que chez les personnes ayant une alimentation riche en fibres, fruits et légumes, on trouvait davantage l'entérotipe *Prevotella*.

Mais l'entérotipe n'est pas tout. Les microbiotes diffèrent également par leur « richesse génétique » : selon les métagénomes, elle varie de 200 000 gènes à plus de 800 000 gènes. Pour étudier le lien entre cette diversité génétique et l'obésité, les agences de recherche françaises et européennes ont financé plusieurs programmes visant à caractériser précisément les composants bactériens du microbiote et leurs relations avec des traits cliniques et biologiques associés à l'obésité, comme la corpulence, la glycémie, le taux de lipides sanguins, certaines molécules inflammatoires ou encore des paramètres tissulaires (l'obésité est en effet associée à des changements biologiques importants dans de nombreux tissus – tissus adipeux, foie, muscle, intestin, cerveau).

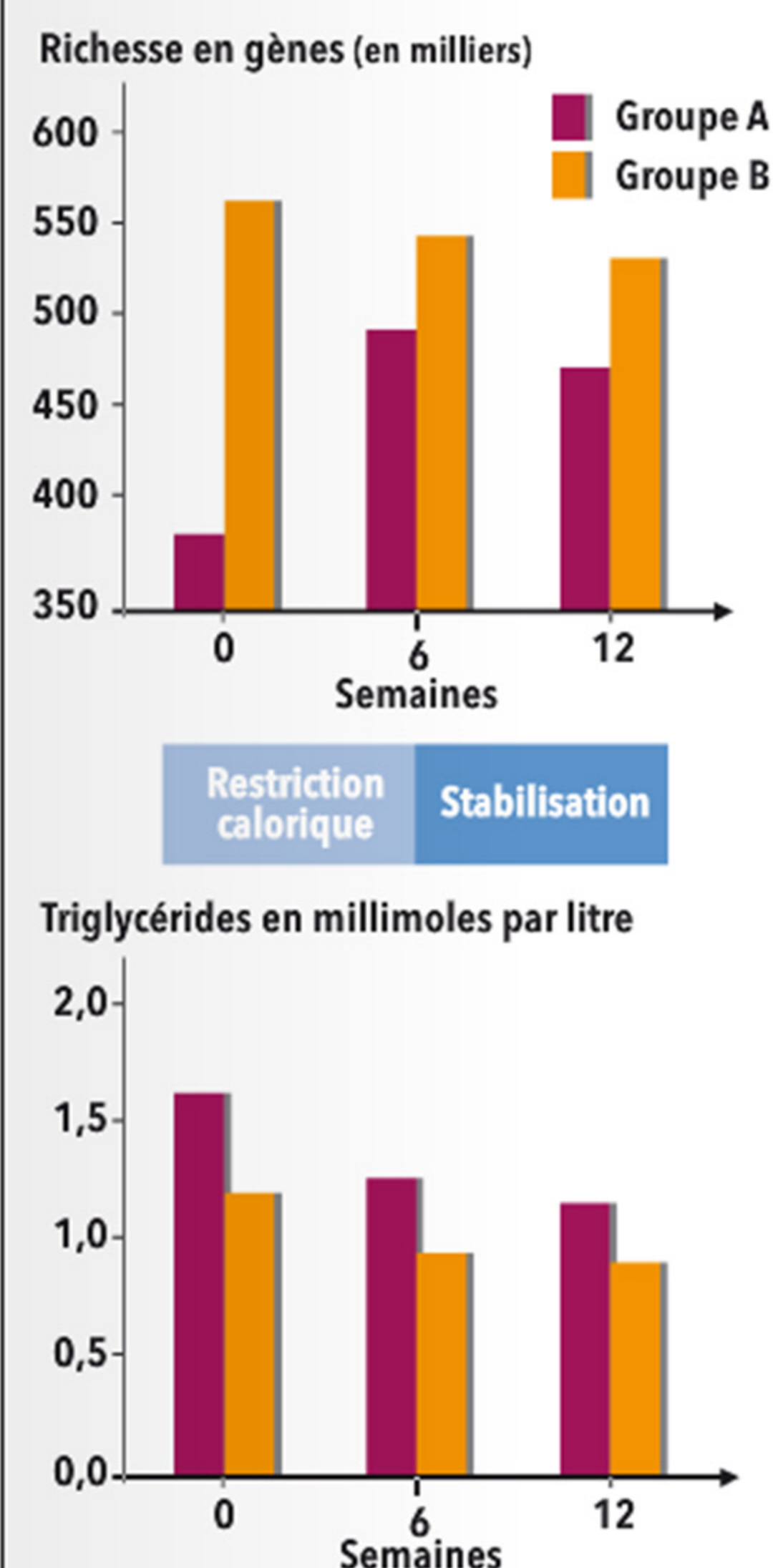
Récemment publiés, les résultats d'un de ces programmes, auquel nous

## Les maladies cardio-métaboliques sous l'angle bactérien

Il s'appelle Metacardis, associe 14 équipes dans 6 pays européens et a été lancé fin 2012 : ce programme européen de cinq ans, coordonné par Karine Clément à l'Inserm, a pour objectif d'étudier le rôle du métagénome dans les complications cardio-métaboliques de l'obésité : diabète, athérosclérose et insuffisance cardiaque. Hétérogènes dans leurs manifestations cliniques, ces maladies évoluent dans le temps, et deviennent chroniques. L'enjeu de Metacardis est donc clinique et scientifique : il s'agit de caractériser les profils métagénomiques associés aux différents stades de progression de ces maladies, trouver de nouvelles pistes biologiques, identifier les personnes présentant un plus fort risque de développer ces complications et mettre au point des tests diagnostiques. Deux mille personnes caractérisées de façon détaillée à différents stades de leur maladie cardio-métabolique, recrutées à l'hôpital de la Pitié-Salpêtrière à Paris, à l'université de Copenhague au Danemark et à l'université de Leipzig en Allemagne, y participeront.



**Fig.2 Diversité améliorée**



**UN RÉGIME DE 6 SEMAINES** de restriction calorique et 6 semaines de stabilisation a été suivi par des personnes obèses ou en surpoids. Au départ, une partie (groupe A, en rouge) avait un microbiote beaucoup moins diversifié (en haut), et une concentration de triglycérides sanguins plus élevée (en bas) que les autres (groupe B, en orange). La diversité génétique de leur microbiote a augmenté au cours du régime, mais pas assez pour que leur concentration de triglycérides baisse autant que dans le groupe B.

SOURCE : A. COTILLARD ET AL., *NATURE*, 500, 585, 2013.

avons contribué, montrent l'importance de la perte de diversité bactérienne chez les personnes obèses. Ils soulignent en particulier le lien entre une faible diversité du microbiote et les dysfonctionnements métaboliques et inflammatoires. Cette étude portait sur 292 adultes danois (169 obèses et 123 non-obèses) de la cohorte du projet Metahit [5]. Elle a révélé que le nombre de gènes du métagénome variait

considérablement selon les individus, et qu'au sein des adultes obèses, on distinguait nettement deux groupes : les personnes dont le microbiote présentait une faible diversité bactérienne, et celles dont le microbiote avait une diversité élevée. Or les premières, qui représentaient un tiers de l'ensemble des personnes obèses, montraient les stigmates les plus marqués d'une dysfonction métabolique : une élévation de la glycémie et de la résistance à l'insuline, des anomalies des taux de lipides sanguins, ainsi qu'une inflammation chronique de bas-grade. Ces sujets étaient également ceux qui avaient pris le plus de poids sur une période de neuf ans.

**Régime riche en fibres.** En parallèle, nos équipes ont montré que, comme les sujets danois, 49 patients français, obèses ou en surpoids, suivis à l'hôpital de la Pitié-Salpêtrière à Paris, se distinguaient par la diversité de leur microbiote : lorsque celle-ci était faible, l'insulino-résistance et le taux de triglycérides sanguins étaient plus élevés [6]. Mais ce n'est pas tout. Nous avons aussi étudié ce qui se passait lorsque ces sujets étaient soumis à six semaines d'un régime restrictif calibré pauvre en graisses mais enrichi en fibres, en protéines et en glucides à faibles index glycémique. Cette intervention diététique était associée à une perte de poids de 5 % du poids initial en moyenne, et à une amélioration des paramètres métaboliques et inflammatoires. Toutefois, cette amélioration était moins marquée chez les patients ayant, au départ, une faible diversité bactérienne. Alors même qu'à l'issue du régime, cette diversité avait, chez eux, beaucoup augmenté [fig. 2]. On constate donc qu'une faible diversité bactérienne du microbiote est prédictive d'une moins bonne réponse à l'intervention diététique.

Par ailleurs, dans le cadre d'une autre étude, nous avons suivi plusieurs patients ayant fait l'objet d'une chirurgie de bypass gastrique. L'efficacité de cette intervention pour améliorer les paramètres métaboliques et inflam-

matoires des patients est reconnue. Or en parallèle de ces améliorations, nous avons aussi constaté, chez nos patients, une augmentation postopératoire de la diversité du microbiote, ainsi qu'un changement dans l'expression de 202 gènes dans le tissu adipeux (parmi lesquels des gènes impliqués dans le métabolisme et l'inflammation). Ces associations entre la diversité du microbiote et les paramètres cliniques et tissulaires des patients dépendaient pour moitié des variations de l'apport alimentaire, pour moitié non [7].

Toutes les études récentes convergent donc vers une répercussion majeure du microbiote intestinal sur le surpoids, l'obésité et les complications métaboliques associées, si bien qu'un microbiote présentant une faible diversité génétique peut désormais être considéré comme un phénotype à risque. Il faudra donc, sur cette base, développer des tests diagnostiques fiables pour accompagner la prise en charge clinique des patients. L'enjeu est considérable ! En parallèle, on peut aussi envisager de modifier la diversité du microbiote intestinal dominant, en ajustant les apports alimentaires. Pour y parvenir, il faudra donc concevoir des « aliments fonctionnels » capables de promouvoir la diversité du microbiote intestinal, sa résistance, sa résilience et sa stabilité. ■

- [1] P.J. Turnbaugh et al., *Nature*, 444, 1027, 2006.
- [2] R.E. Ley et al., *Nature*, 444, 1022, 2006.
- [3] J. Quin et al., *Nature*, 464, 59, 2010.
- [4] M. Arumugam et al., *Nature*, 473, 174, 2011.
- [5] E. Le Chatelier et al., *Nature*, 500, 541, 2013.
- [6] A. Cotillard et al., *Nature*, 500, 585, 2013.
- [7] L.C. Kong et al., *Am. J. Clin. Nutr.*, 98, 16, 2013.

#### Pour en savoir plus

- Cécile Klingler, « Un autre génome pour l'homme », *Les Dossiers de La Recherche*, novembre 2010, p. 22.
- Karine Clément et Joël Doré, « Des bactéries qui stockent les graisses », *Les Dossiers de La Recherche*, novembre 2010, p. 28.
- Gérard Corthier, *Bonnes bactéries et bonne santé*, Éditions Quae, 2011.
- <http://tinyurl.com/inra-microbiote> Un dossier de l'INRA sur le microbiote intestinal, à destination du grand public.



# Le mystère des chats qui retombent toujours sur leurs pattes

Quelle que soit sa position au départ de la chute, un chat atterrit sur ses pattes. Pour que les physiciens et les physiologistes expliquent ce phénomène, il a fallu un siècle d'observations et l'aide de la photographie.



**PAR Greg Gbur,**  
professeur associé à l'université  
de Caroline du Nord,  
à Charlotte, aux États-Unis, et auteur  
du blog *Skulls in the Stars*.

## L'essentiel

> **JAMES CLERK MAXWELL** est le premier physicien, au milieu du XIX<sup>e</sup> siècle, à essayer de comprendre pourquoi un chat retombe toujours sur ses pattes.

> **DANS LES ANNÉES 1880**, le physiologiste français Étienne-Jules Marey utilise la photographie pour analyser le phénomène.

> **C'EST SEULEMENT EN 1969** que deux mathématiciens américains développent un modèle mathématique qui apporte une explication complète et définitive.

**D**ans les récits mythologiques et folkloriques, dans la fiction aussi, le chat est la créature secrète par excellence.

On l'imagine souvent doté de pouvoirs surnaturels. La communauté scientifique, physiciens et physiologistes en tête, resta longtemps perplexe face à l'un de ses réflexes les plus reconnus : sa capacité à retomber sur ses pattes, quelle que soit sa position au moment où on le lâche. Il lui aura fallu plus d'un siècle, et la mobilisation de ressources intellectuelles et technologiques particulièrement sophistiquées, pour percer ce secret. Alors même qu'il est résolu, ce problème du « chat tournant » continue de fasciner les scientifiques, qui s'efforcent maintenant de reproduire ce mouvement, par ordinateur ou grâce à des robots.

Si le mystère du retournement du chat a attiré l'attention de quelques-uns des esprits scientifiques les plus brillants des XIX<sup>e</sup> et XX<sup>e</sup> siècles, c'est pour une raison simple : ce phénomène semble défier une loi fondamentale de la physique, à savoir la loi de conservation du moment cinétique. Le moment cinétique d'un objet, que l'on pourrait aussi appeler sa « quantité de rotation », a été défini pour la première fois par Isaac Newton, en 1687, puis complété par Leonhard Euler près d'un demi-siècle plus tard. Il dépend de la masse de

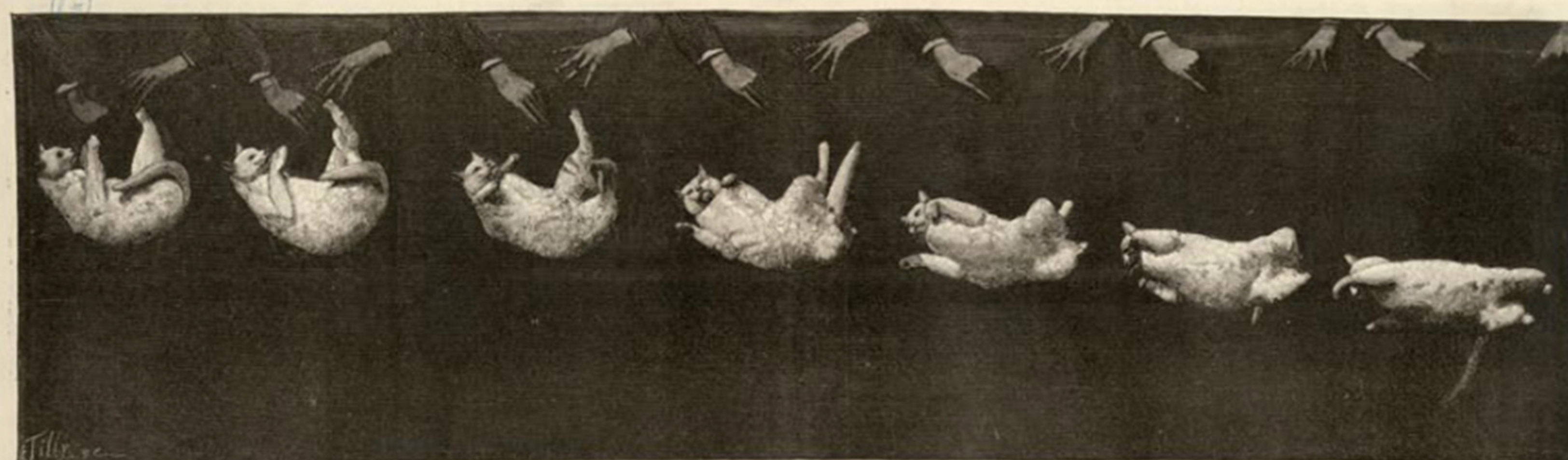
l'objet, ainsi que de la manière dont elle est répartie ; ces deux éléments déterminent aussi la résistance à la rotation. Plus le diamètre d'une roue est grand, plus il sera difficile de modifier la vitesse et la direction de sa rotation.

Autre particularité du moment cinétique, pour un objet rigide : il est proportionnel à la fréquence de rotation, de telle sorte que, si on double la vitesse de rotation d'une roue, on double aussi son moment cinétique. À l'inverse, si une roue est statique, son moment cinétique vaut zéro.

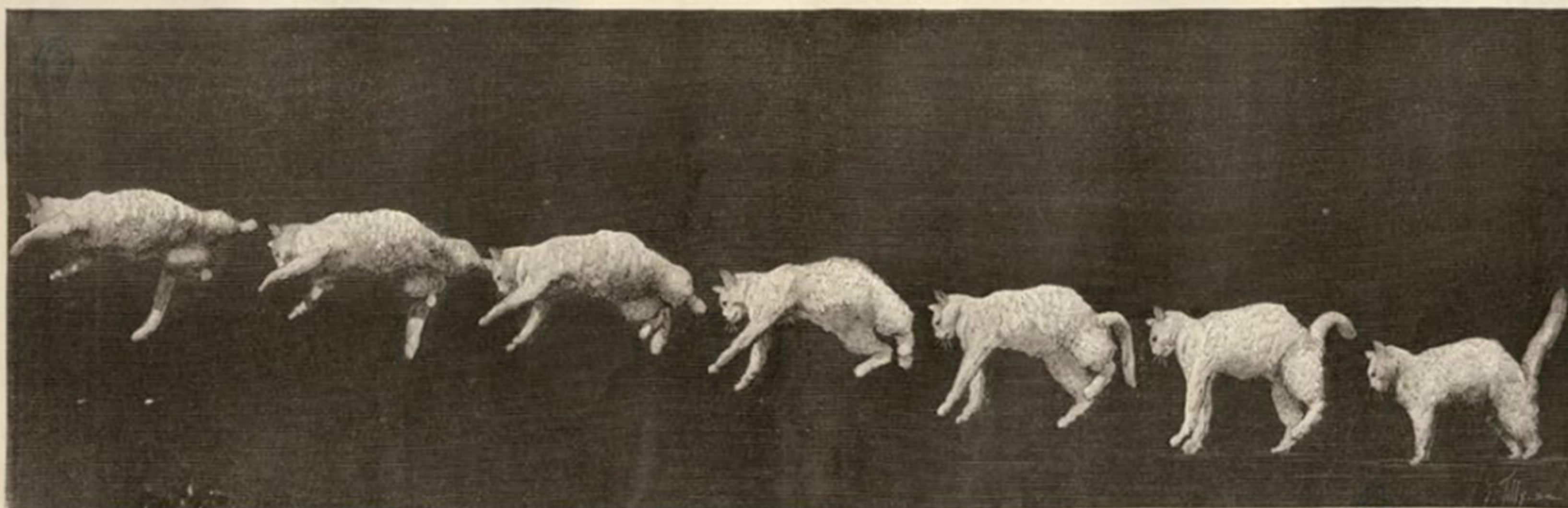
**Moment cinétique.** La conservation du moment cinétique implique que, si l'on veut mettre un objet statique en rotation dans un sens, il faut communiquer un mouvement de rotation inverse, de même force, à un autre objet. Ce qui nous amène à quelques conclusions plutôt amusantes : quand un cycliste fait tourner les roues de son vélo, le moment cinétique communiqué à ces dernières est compensé par un moment cinétique de sens inverse, mais de force équivalente, communiqué à la Terre. Heureusement, la Terre est si grande et si massive que le mouvement de rotation qui lui est transmis est en fait négligeable.

Si nous en revenons au chat, on saisit mieux pourquoi une analyse physique simpliste, fondée sur la conservation du moment cinétique, suggère qu'il lui soit





1 Suspendu dans le vide. 2 Lâché! 3 Il tombe. 4 Il se retourne. 5 6 7



8 9 10 11 12 13 Et il retombe toujours sur ses pattes. 14

L'ILLUSTRATION

3 NOVEMBRE 1894

© ÉTIENNE JULES MAREY/BIU SANTÉ (PARIS)

**Grâce à un appareil capable de photographier 60 images par seconde, Étienne-Jules Marey confirma en 1894 que les chats se retournaient sans point d'appui, en contradiction avec les principes mécaniques élémentaires.**

impossible d'accomplir une rotation de 180 degrés au cours de sa chute, si on le lâche sans lui impulser un mouvement de rotation au départ. Pourtant, c'est bel et bien ce qui se produit la plupart du temps. Et c'est cette contradiction apparente qui a piqué la curiosité d'un certain nombre de scientifiques.

Le premier d'entre eux n'est autre que le Britannique James Clerk Maxwell, père de la théorie moderne de l'électromagnétisme et le premier, en 1865, à émettre l'idée que la lumière soit une onde électromagnétique. Alors qu'il étudiait au Trinity College, à Cambridge, au Royaume-Uni, Maxwell effectua de nombreuses expériences sur ce sujet des « chats qui tournent ». Ce qui lui valut une certaine réputation au sein de l'école, comme il s'en rendit compte des années plus tard, alors qu'il y était revenu pour faire passer des examens à des étudiants.

Il le raconta d'ailleurs à sa femme, dans une lettre : « Il existe une légende

à Trinity, selon laquelle, au cours de mes études ici, j'ai découvert une méthode pour jeter les chats sans qu'ils retombent sur leurs pattes, et aussi que j'avais l'habitude de lancer des chats par la fenêtre. J'ai été obligé d'expliquer que le véritable objet de ma recherche était de découvrir à quelle vitesse un chat se redresse, et qu'il n'y avait, pour y parvenir, qu'une seule méthode : laisser tomber un chat sur une table ou un lit, depuis une hauteur de 5 centimètres. J'ai ainsi découvert que, même dans ces circonstances, le chat retombe toujours sur ses pattes. » [1]

**Les limites de l'œil humain.** Les investigations de Maxwell ont, semble-t-il, inspiré un autre brillant physicien de l'époque, George Gabriel Stokes. Auteur d'importantes contributions en optique, en mathématiques et en mécanique des fluides, Stokes s'est aussi, dans les années 1870, intéressé de très près à la question des chats tournants.

Mais, en dépit de leurs talents scientifiques, ni Maxwell ni Stokes n'avaient grand espoir d'apprendre quoi que ce soit de leurs expériences. La faute en incombait aux limites de l'œil humain. En effet, si l'on admet, comme l'avance Maxwell, qu'un chat peut se retourner au cours d'une chute de 5 centimètres de hauteur, cela signifie qu'il doit y parvenir en quelques dixièmes de seconde tout au plus. Un laps de temps bien trop court pour que l'œil humain puisse saisir les détails de l'action.

Heureusement, une technologie se développait rapidement à l'époque : la photographie. Elle se révéla bientôt une aide fort utile dans la résolution de questions scientifiques. En 1872, c'est grâce à l'une de ses photographies que Eadweard Muybridge, photographe britannique, vérifia la vieille hypothèse selon laquelle un cheval au galop décolle ses quatre sabots du sol en même temps. Dans les années suivantes, il fut le premier à réaliser des séries >>>



# Le mystère des chats qui retombent toujours sur leurs pattes

➤ d'images d'un cheval en mouvement et à mettre au point une machine, le zoopraxiscope, pour les visualiser. Il devint ainsi l'un des premiers réalisateurs de films de l'histoire.

**Fusil photographique.** Muybridge n'était pas un scientifique, mais son travail présentait un intérêt scientifique indéniable. À tel point que les maga-

zines *Scientific American* et *La Nature* décidèrent de publier ses photographies de cheval en mouvement en 1878. C'est par ce biais que le physiologiste français Étienne-Jules Marey en prit connaissance, en 1881.

Marey peinait alors à faire avancer ses études sur la mécanique du mouvement animal. Il invita Muybridge à lui faire une démonstration à Paris, et

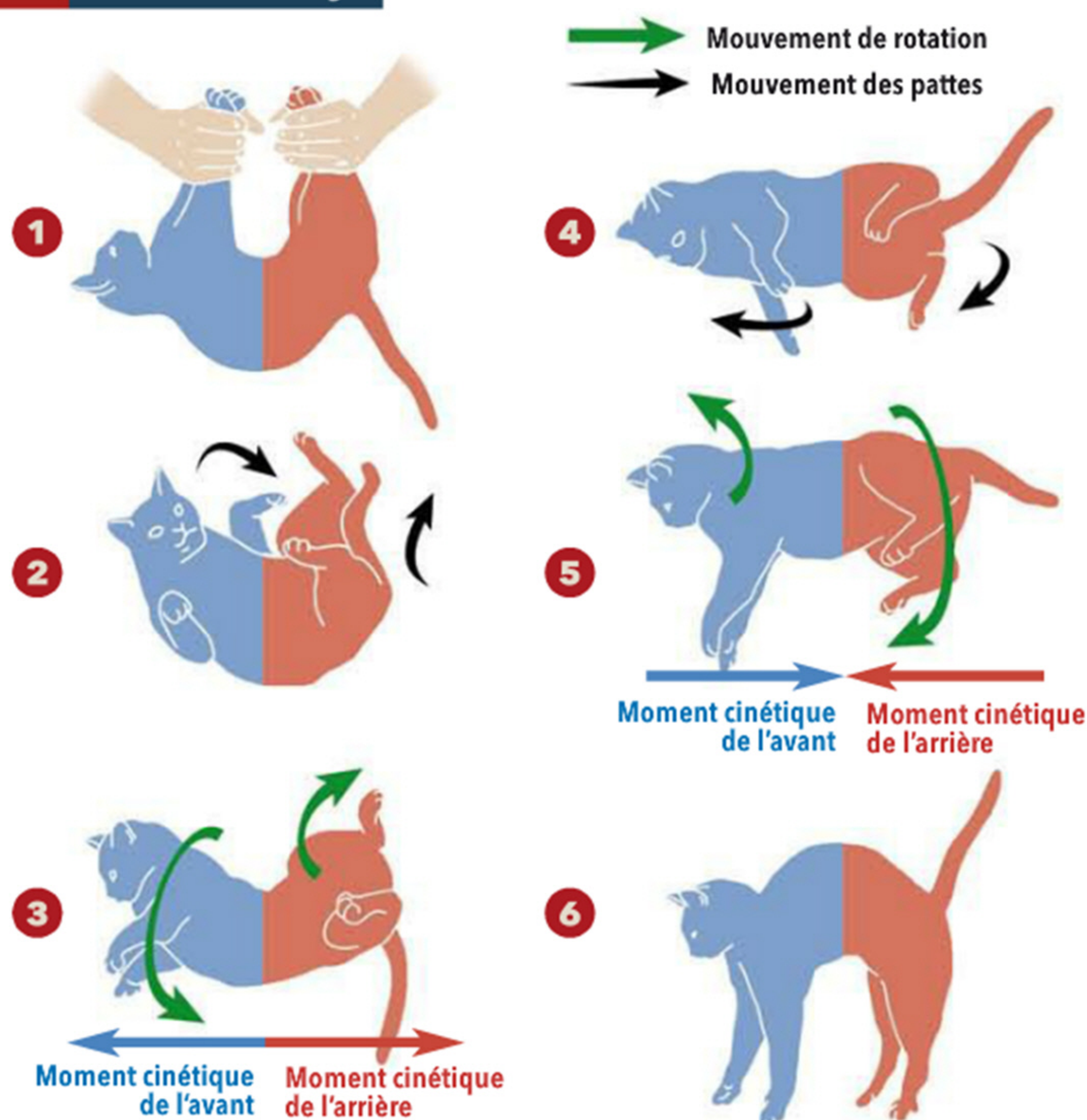
réalisa bien vite tout ce que la photographie pouvait apporter à ses recherches. Dès l'année suivante, le physiologiste concevait son « fusil » photographique, capable de prendre 12 clichés à la seconde. Il utilisa son instrument, et ses versions perfectionnées, pour étudier les mouvements indétectables à l'œil nu, dont le retournement des chats.

En 1894, Marey présenta ses études photographiques du phénomène félin à ses confrères de l'Académie des sciences ; ses clichés avaient été réalisés avec un appareil capable de prendre 60 photographies à la seconde [2]. Ses conclusions rencontrèrent de vives résistances. Certains académiciens, dont l'ingénieur Maurice Lévy, le zoologue Henri Milne-Edwards et le chimiste Marcellin Berthelot, ne croyaient pas au fait qu'un chat puisse se retourner, au cours d'une chute libre, sans prendre appui sur une surface solide. « C'est en contradiction directe avec les principes mécaniques les plus élémentaires », déclara l'un d'eux, cité anonymement dans un article du *New York Herald* rapportant les débats. Le même académicien anonyme suggéra que la rotation du chat avait dû être impulsée par l'expérimentateur lui-même.

Marey, qui pouvait compter sur le soutien d'un certain nombre d'académiciens – y compris, plus tard, de Lévy, qui changea d'avis sur la question – fit remarquer qu'aucun élément, dans ses photographies, ne permettait de soutenir cette théorie. Afin de trancher la question, il promit de faire l'expérience une nouvelle fois, en suspendant un chat à un fil, que l'on couperait à un moment donné.

**Deux rotations et un retournement.** Ses partisans et lui étaient convaincus que cette nouvelle expérience prouverait leur hypothèse selon laquelle le chat, au cours de sa chute, se retourne par rotations successives de ses parties avant et arrière, en trois étapes. Première étape : le chat étend ses pattes arrière et rétracte celles de devant. La partie avant du corps possède alors un diamètre plus petit que la partie arrière, ce qui lui permet de tourner plus vite,

**Fig.1** Une question de mouvement des pattes selon Marey



**QUAND ON LÂCHE UN CHAT (1),** il replie ses pattes antérieures (en bleu) et étend ses pattes postérieures (en rouge) (2). Le train antérieur tourne alors d'un angle plus grand que le train postérieur, et dans le sens opposé, ces deux mouvements produisant des moments cinétiques qui s'annulent mutuellement (3). Puis le chat étend ses pattes avant et rétracte ses pattes arrière (4), ce qui lui permet de compléter son retournement selon le même principe qu'à l'étape 3 (5) et de retomber sur ses pattes (6).



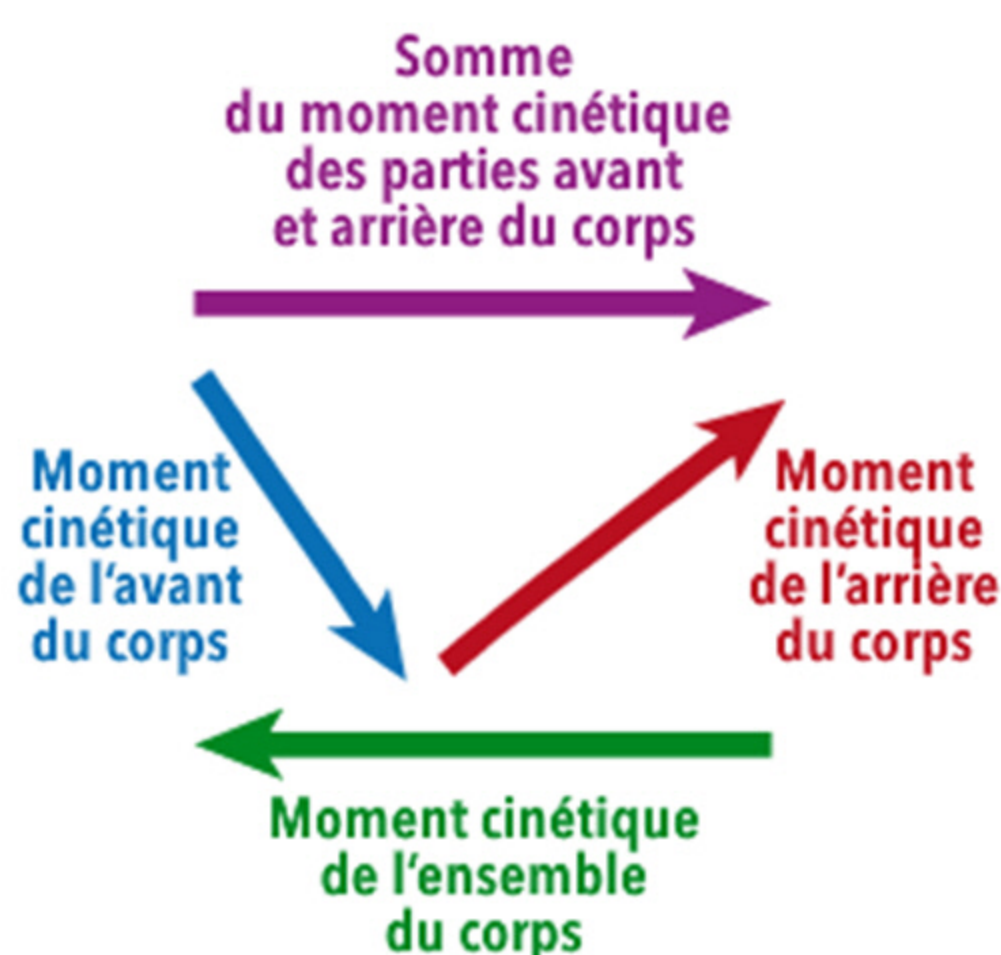
comme dans l'exemple de la roue cité plus haut. C'est en effet ce qui se passe dans la deuxième étape : le chat effectue une grande rotation de la partie avant de son corps dans un sens, tout en faisant pivoter, d'un angle plus petit, sa partie arrière dans l'autre sens. Troisième et dernière étape : le chat étend ses pattes avant et rétracte celles de derrière, ce qui lui permet de faire pivoter son arrière-train plus que ses pattes avant, toujours dans des sens différents, et ainsi de compléter sa rotation [fig. 1]. Les photographies confirmèrent en partie cette hypothèse, mais pas suffisamment pour lever tous les doutes.

**Oreille interne.** L'affaire en resta là jusqu'en 1922. Cette année-là, le physiologiste allemand Rudolf Magnus, par ailleurs pharmacologue, publia une étude, pour laquelle il avait utilisé un appareil photographique capable de prendre 200 clichés à la seconde. L'interrogation principale de Magnus, comme pour les autres physiologistes, était de déterminer comment un chat distingue le haut du bas au cours de sa chute et, de ce fait, comment il parvient à s'orienter. Dans son étude, il mit en évidence le rôle essentiel de l'oreille interne du chat. « *Les animaux qui ne possèdent pas d'oreille interne atterrissent sur le sol comme des sacs de pommes de terre* », expliquait-il. L'analyse de ses photographies, complétée par quelques clichés de Marey, l'amena aussi à conclure que c'est la tête du chat qui guide la rotation pendant la chute : l'animal tourne la tête pour rechercher le sol, avant que le reste du corps ne suive le mouvement, dans une sorte d'« ondulation elliptique » [3].

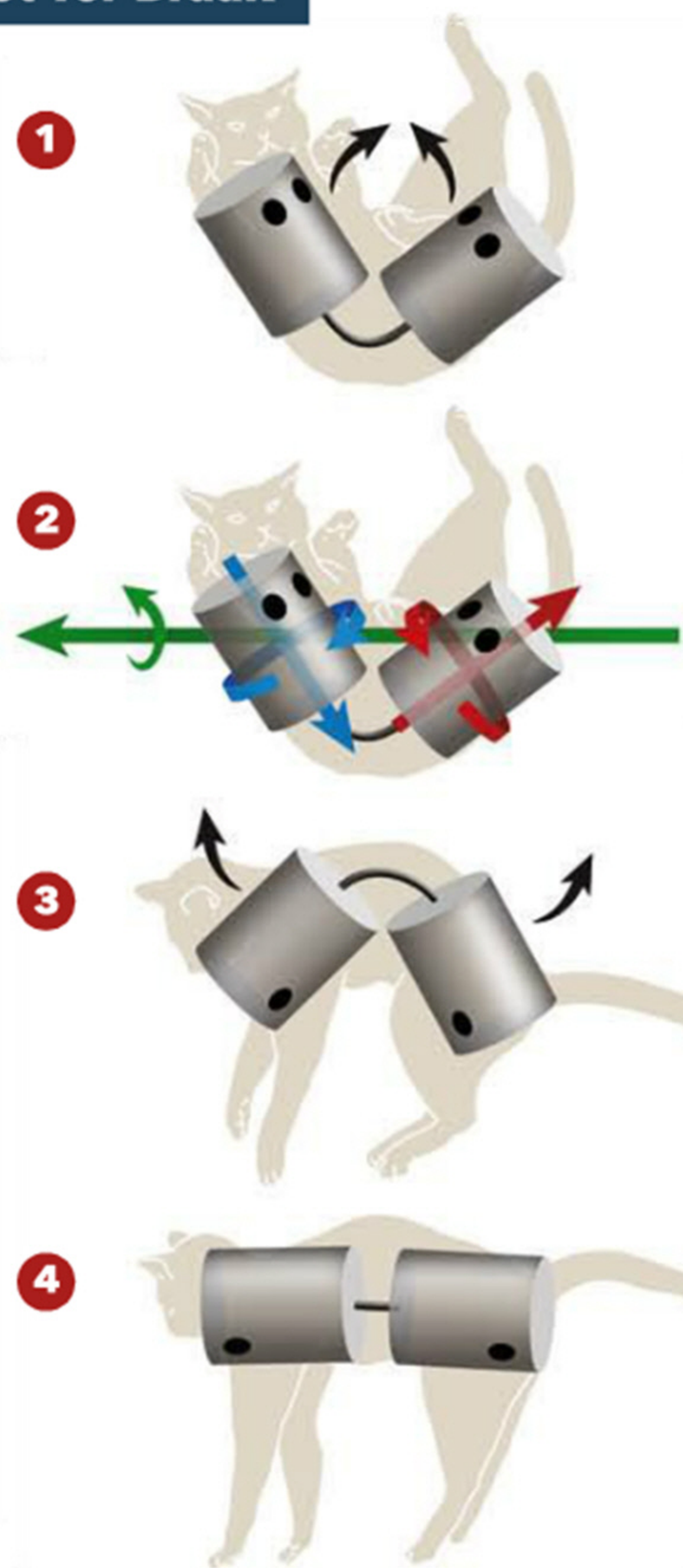
Mais Magnus n'alla pas plus loin dans son explication, au contraire de son étudiant, Gijsbert Gottfried Jan Rademaker. Dans les années 1930, celui-ci entreprit sa propre analyse photographique du phénomène avec Jan Willem Gisbertus Ter Braak, son collègue à l'université de Leyde, aux Pays-Bas. Leurs travaux débouchèrent en 1935 sur la publication d'un article, qui constitue la première description raisonnablement précise de la physique des chats tournants [4].

## Fig.2 Le redressement du chat d'après Rademaker et Ter Braak

LE CHAT se plie en deux au début de la chute (1).



Il fait alors tourner ses parties antérieures (en bleu) et postérieures (en rouge) dans le même sens et d'un angle équivalent. La somme des deux moments cinétiques ainsi produits (en violet) est compensée par un mouvement de rotation global du chat (en vert). C'est l'ensemble de ces mouvements qui provoque son retournement (2). Il ne lui reste plus qu'à se redresser (3) et à atterrir sur ses pattes (4).



© INFOGRAPHIE : SYLVIE DESSERT

Ils prouvaient que la description de Marey ne pouvait qu'être fautive. En suivant le raisonnement du physiologiste français, le chat aurait eu besoin, pour se retourner, d'alternier de multiples torsions du haut et du bas de son corps. Or les photographies de Rademaker et Ter Braak n'allèrent pas dans ce sens.

Alors, quel était le secret de la rotation des chats ? Selon les deux hommes, tout tenait au fait que le félin, au départ de sa chute, se plie en deux au niveau de la taille. Redécomposons maintenant le mouvement dans son ensemble, en intégrant ce paramètre. Et, pour simplifier les choses, considérons, à leur suite, que les membres supérieurs et inférieurs d'un chat sont en fait deux cylindres de taille et de masse équivalentes,

reliés entre eux. Supposons aussi que le félin peut faire tourner les deux moitiés de son corps à la même vitesse, et dans la même direction, en faisant appel à divers muscles essentiels [fig. 2].

Du fait que le chat soit plié à la taille, les deux parties de son corps tournent dans le même sens – celui des aiguilles d'une montre par exemple – mais autour d'axes différents. Chacune génère donc son moment cinétique propre, qui possède sa propre direction. En revanche, comme les deux « cylindres » sont de même taille et de même masse, leur vitesse de rotation, elle, est la même.

Pour compenser la somme des moments cinétiques des parties avant et arrière et, en vertu de la loi de >>>



## Histoire

# Le mystère des chats qui retombent toujours sur leurs pattes

» conservation du moment cinétique, le corps «total» du chat impulse une rotation dans le sens inverse de celui des parties – ici, dans le sens contraire des aiguilles d'une montre.

Mais, du fait de son diamètre et de sa masse plus importants, le corps «total» oppose une résistance plus grande à la rotation. Il va donc tourner moins vite que les parties avant et arrière, prises séparément. De fait, quand celles-ci se tordent de 270 degrés dans un sens, la contre-rotation globale du corps est bien moindre, de l'ordre de 90 degrés par exemple. On comprend ainsi comment le chat parvient à se retourner complètement, pour atterrir sur ses pattes.

## Modélisation mathématique.

L'analyse de Rademaker et Ter Braak ne satisfait pas tout le monde. Au milieu des années 1950, le physiologiste Donald McDonald, de l'hôpital universitaire Saint-Bartholomew, à Londres, affina à nouveau l'analyse du phénomène. Grâce à un appareil photographique capable de prendre 1500 clichés par seconde, il montra que les parties avant et arrière d'un chat ne tournent pas forcément en simultané. Pour la première fois, il mit aussi en évidence le fait que le dos du chat s'aplatit à la fin de la rotation. Mais McDonald ne tira aucune analyse quantitative de ses observations et son explication resta incomplète [5].

C'est finalement en 1969 que Thomas Kane et Mark Scher, deux mathématiciens de l'université Stanford, aux États-Unis, apportèrent une explication complète et définitive au vieux secret des chats tournants. Dans leur article, les deux hommes développaient un modèle mathématique qui



**Lâché verticalement, ce prototype de robot devrait se retourner comme un chat sans autre point d'appui que l'air. Il a été mis au point par le groupe de locomotion robotisée du MIT, aux États-Unis.**

explique toutes les caractéristiques importantes du phénomène. Ce modèle améliorait la théorie de Rademaker et Ter Braak, même si cela se faisait «au détriment de la simplicité», selon le propre aveu des auteurs. Kane et Scher eurent eux aussi recours à la technologie pour mettre au point leur modèle : non aux appareils photographiques, comme leurs prédécesseurs, mais aux ordinateurs du centre de calcul de Stanford, qui les aida à produire des simulations de la rotation du chat [6].

La résolution du mystère des chats qui tournent n'épuisa pourtant pas l'intérêt des scientifiques pour le sujet. En 1993, le mathématicien Richard Montgomery, de l'université de Californie à Santa Cruz, aux États-Unis, appliqua à la question la théorie de jauge – outil mathématique utilisé de manière récurrente en physique théorique des particules. Il cherchait à déterminer s'il n'existait pas une série de mouvements plus efficaces que celle du chat pour se retour-

ner. Il dut conclure à la supériorité du félin, dont la stratégie est plus rapide et plus simple que n'importe lequel des modèles qu'il mit au point [7]. Plus récemment encore, en 2003, Robert Batterman, de l'université d'État de l'Ohio, aux États-Unis, établit que le réflexe de redressement des chats se rapproche, mathématiquement parlant, de divers systèmes physiques en mécanique, en optique et en théorie quantique, via un phénomène connu sous le nom de «phase géométrique».

**Intérêt en robotique.** En raison de sa sophistication, le mouvement des chats tournants a aussi suscité beaucoup d'intérêt parmi les chercheurs en robotique, qui se sont lancé le défi de le reproduire. En 1995, John Ronald Galli, de l'université d'État Weber, aux États-Unis, conçut des modèles mécaniques simples de chats, capables de reproduire les rotations décrites par Rademaker et Ter Braak [8]. Plus récemment, les membres du groupe de locomotion robotisée du MIT, aux États-Unis, ont également produit plusieurs prototypes de chats qui tournent, sans parvenir à leurs fins. Enfin, depuis l'année dernière, un groupe d'étudiants de l'université d'Adelaïde, en Australie, travaille lui aussi sur un prototype, sans succès pour le moment. Les chats n'ont pas encore livré tous leurs secrets à la science. ■

[1] L. Campbell et W. Garnett, *The Life of James Clerk Maxwell*, MacMillan and Co., p. 499, 1882.

[2] E.-J. Marey, *Comptes Rendus*, 119, 714, 1894.

[3] R. Magnus, *Archs Néerl. Physiol.*, 7, 218, 1922.

[4] G.G.J. Rademaker et J.W.G. Ter Braak, *Acta oto-lar.*, 23, 313, 1935.

[5] D.A. McDonald, *J. Physiol.*, Paris, 129, 34, 1955 ;

D.A. McDonald, *St. Bart's Hosp. J.*, 56, 254, 1955.

[6] T.R. Kane et M.P. Scher, *Int. J. Solids and Structures*, 55, 663, 1969.

[7] R. Montgomery, *Fields Inst. Commun.*, 1, 193, 1993.

[8] J.R. Galli, *Phys. Teach.*, 33, 404, 1995.

## Pour en savoir plus

» <http://skullsinthestars.com>

» <http://bit.ly/1nmm1Us> Projet de chat tournant du groupe de locomotion robotisée du MIT.

» <http://bit.ly/1nmm9TV> Projet de chat robotisé qui retombe sur ses pattes, université d'Adelaïde.



## Et recevez en cadeau 2 numéros des Dossiers de La Recherche sélectionnés par la rédaction



### LES ÉNERGIES DE DEMAIN

Comment anticiper la consommation croissante d'énergie, à l'heure où les hydrocarbures se raréfient, où le nucléaire inquiète, et où les énergies propres manquent encore de maturité ? Face aux limites du modèle actuel, se développent déjà des initiatives pour l'avenir. Nous vous les présentons dans ce numéro.



### LES PLUS BELLES ÉNIGMES DE LA SCIENCE

Depuis la nuit des temps, de nombreuses questions sans réponse intriguent les scientifiques. Qu'il s'agisse des mystères planant sur les origines premières (du temps, de la matière, de la vie ?), ou sur les grandes disparitions, ce numéro des Dossiers de La Recherche fait un point complet et actuel sur les plus belles énigmes de la science.



1 AN - 12 n<sup>os</sup>

**62€**

au lieu de ~~76€80~~

Soit **20%**  
de réduction

## BULLETIN D'ABONNEMENT

À retourner sous enveloppe affranchie à La Recherche - Service Abonnements - 17, route des Boulangers - 78926 Yvelines cedex 9

**OUI**, je souhaite m'abonner à **La Recherche** et recevoir **EN CADEAU** les 2 numéros des Dossiers de La Recherche : **Les énergies de demain (N°47) + Les plus belles énigmes de la Science (N°50)**.

PLRC487

☐ **1 AN - 12 NUMÉROS** au prix de **62€** au lieu de ~~76€80\*~~ soit près de **15€** d'économie.

Je préfère l'abonnement couplé avec les Dossiers :

☐ **1 AN - 12 NUMÉROS + 6 numéros des Dossiers de La Recherche** au prix de **89€** au lieu de ~~118€20\*~~ soit près de **30€** d'économie.

Je profite de l'**option 4 fois sans frais** et je règle dès maintenant par chèque ou CB mon premier paiement soit :

☐ **15€50** pour **1 AN - 12 N<sup>os</sup>**.

☐ **22€25** pour **1 AN - 12 N<sup>os</sup> + 6 N<sup>os</sup>** des **Dossiers de La Recherche**.

Puis je recevrai par courrier l'autorisation de prélèvement qui me permettra de régler les trois autres versements par prélèvement automatique trimestriel.

J'indique ci-dessous mes coordonnées :

Nom : \_\_\_\_\_

Prénom : \_\_\_\_\_

Adresse : \_\_\_\_\_

Code Postal : \_\_\_\_\_

Ville : \_\_\_\_\_

Téléphone : \_\_\_\_\_

Si vous souhaitez recevoir des offres de notre part, merci de nous indiquer votre e-mail :

\_\_\_\_\_@\_\_\_\_\_

Je règle à l'ordre de La Recherche par :

☐ Par chèque ☐ Par carte bancaire

Numéro CB : \_\_\_\_\_

Notez aussi les 3 derniers chiffres du numéro inscrit au dos de votre carte bancaire, au niveau de la signature : \_\_\_\_\_

Expire fin : \_\_\_\_\_

Signature obligatoire



# L'histoire mouvementée

Les dalles de pierre qui recouvrent certains dolmens ne faisaient pas partie de ces monuments à l'origine. Elles ont été placées des siècles après leur construction, dans le but de les condamner.



**PAR Claude Masset,**  
préhistorien, chercheur associé à la  
Maison René-Ginouvès d'archéologie  
et d'ethnologie de l'université  
de Nanterre. DR

**L**es dolmens, grandes tables de pierre formées de blocs pesant plusieurs tonnes, ont été construits en Europe occidentale entre le cinquième et le troisième millénaire avant notre ère. Ils sont l'œuvre de sociétés du Néolithique, qui furent les premières à devenir sédentaires et à pratiquer

l'agriculture (lire « L'œuvre de populations du Néolithique », p. 62). Ils leur servaient de monuments funéraires et abritaient des sépultures collectives. Ils étaient constitués de pierres dressées, les orthostates, qui ont été, la plupart du temps, surmontées d'une ou de plusieurs très grosses dalles placées à l'horizontale.





# d'une allée mégalithique

Longtemps, on a pensé que les orthostates et les dalles de couverture avaient été érigés à peu près en même temps, constituant d'énormes boîtes de pierre où l'on aurait introduit les défunts. Des fouilles réalisées à partir des années 1980 ont toutefois montré que la réalité avait pu être différente, du moins pour les « allées couvertes », dolmens très allongés en forme de couloir, recouverts de plusieurs dalles de pierre horizontales et en général dépourvues de tumulus\*, contrairement aux autres dolmens. En 1982, l'archéologue Jean Leclerc avança pour la première fois l'hypothèse que les dalles de couverture de ces allées étaient postérieures à la construction des monuments.

Il évoqua des tombes collectives de la région du Mecklenbourg, en Allemagne, où les tables reposaient directement sur des sédiments plus récents que les inhumations de l'époque néolithique. De tels exemples existent également en France, comme à Saint-Étienne-du-Vauvray, dans l'Eure, où la chose fut observée et publiée dès 1843, mais aussitôt oubliée. Malgré ces arguments archéologiques

convaincants, Jean Leclerc rencontra un certain scepticisme.

Il a fallu attendre les analyses complètes des fouilles conduites dans l'allée couverte de Méréaucourt, dans la Somme (voir carte ci-dessous), pour que sa théorie soit confirmée. Menées entre 1981 et 1991, et publiées seulement il y a quelques mois, ces fouilles ont montré en effet que les dalles de couverture ont été posées des siècles après la construction de l'allée elle-même, vers la fin du Néolithique [1].

## Déplacement des pierres dressées.

Longue de 8,50 mètres, large de 3,60 mètres au niveau du vestibule et de 2,30 mètres au chevet, l'allée de Méréaucourt a une forme légèrement trapézoïdale. Elle est enterrée, c'est-à-dire que les orthostates s'élèvent au fond d'une fosse profonde de 1 mètre, creusée dans de l'argile contenant des silex. Ils soutenaient deux tables mégalithiques que nous avons trouvées l'une basculée, l'autre brisée en quatre morceaux. On connaît un certain nombre de monuments analogues dans le Bassin parisien ainsi qu'à 500 kilomètres de là, dans certaines régions de l'Allemagne.

Les analyses anthropologiques ont révélé que la sépulture a régulièrement reçu des inhumations pendant six ou huit siècles, à peu près entre 3500 et 2500 avant notre ère. Cela représente une dizaine d'inhumations par siècle en moyenne.

C'est en étudiant la zone d'entrée de l'allée (le vestibule) que nous avons pu en savoir plus sur les dalles de couverture. Nous avons constaté que cinq orthostates y avaient changé de place, et cela plusieurs siècles après la construction du monument. Ces cinq pierres dressées manifestaient un mouvement convergent : elles avaient été rapprochées les unes des autres.

\* **UN TUMULUS** est un amas de terre ou de pierres qui recouvre une sépulture.

## Chronologie

> **VERS 3500 AV. J.-C. : creusement de la fosse et installation des pierres dressées, probablement couvertes d'un toit en chaume ou en bois.**

> **VERS 2400 AV. J.-C. : remplissage de la fosse sur une dizaine de centimètres avec de l'argile et des silex ; pose des dalles de couverture.**

> **VERS 2000 AV. J.-C. : renversement et destruction des dalles de couverture ; ajout d'une couche de terre sur le monument.**

Nous avons établi que ce « ballet » d'orthostates était postérieur aux inhumations, notamment parce qu'un des orthostates de la chambre funéraire était venu écraser des os en place. Un tel mouvement exigea beaucoup d'efforts puisque le moindre de ces blocs pèse plusieurs centaines de kilogrammes. Le plus gros orthostate n'a pas été changé de place, mais a été intentionnellement incliné. Pour y parvenir, les Néolithiques retirèrent, du côté du mouvement prévu, les petits blocs calant la base de l'orthostate. En effet, tous les orthostates comportent à leur pied des blocs de calage, tant >>>



**L'« allée couverte enterrée » de Méréaucourt, dans la Somme, vue dans le sens de la longueur, telle qu'elle se présentait au début des fouilles en 1981 (l'entrée se trouve à l'autre extrémité). Des deux grosses pierres qui la protègent, l'une a été fracturée, l'autre renversée, environ 2000 ans avant notre ère.**

## L'essentiel

> **LES GRANDES PIERRES PLATES recouvrant l'allée couverte de Méréaucourt, dans la Somme, ne faisaient pas partie de son architecture primitive.**

> **ELLES ONT ÉTÉ PLACÉES des siècles plus tard afin de condamner ce monument.**

> **À L'ORIGINE, l'allée couverte était surmontée d'un toit en pente, fait probablement de bois ou de chaume.**



# L'histoire mouvementée d'une allée mégalithique

» du côté intérieur que du côté extérieur du monument.

Pourquoi ces orthostates furent-ils déplacés ? La seule explication plausible est qu'ils devaient accueillir la dalle de couverture principale de l'allée, celle qui était la plus proche de l'entrée. Épaisse de 1 mètre, elle était trop courte pour que les orthostates de cette zone la soutiennent s'ils étaient restés dans leur position primitive. Ces derniers furent donc rapprochés les uns des autres afin de la recevoir. Cela signifie que la couverture mégalithique fut tardive : elle correspond à une condamnation du monument et n'a rien à voir avec l'architecture primitive du site.

**Préservation des ossements.** Puisque cette dalle ne couvrait pas le monument à l'origine, comment les ossements des morts ont-ils pu être préservés ? Sans couverture, les chiens errants et les bêtes sauvages se seraient nourris des morts et nous en aurions la trace. De plus, à Méréaucourt, comme dans bien d'autres sites du même genre, le sédiment qui se trouve au fond de la fosse est une argile. Il est par conséquent imperméable et il suffit d'une ou deux averses pour la remplir d'eau. Les Néolithiques auraient-ils eu l'habitude d'immerger leurs défunts dans une mare croupissante ?

Ce n'est pas tout à fait impossible, mais un élément va à l'encontre de cette hypothèse. Nous avons constaté qu'un nombre important d'os ont éclaté sur place « en allumettes », ce qu'on appelle habituellement des fractures d'os secs. L'aspect extérieur de ces os laisse penser qu'ils avaient été jadis couverts de mousse, ce qui peut arriver dans un air humide mais pas sous l'eau. L'allée avait donc certainement une couverture étanche.

À cette époque, il ne pouvait s'agir que d'une toiture en pente : le monument était sans doute bien visible dans le paysage, contrairement à ce que suggère son état actuel. Cette toiture n'était pas en tuile ni en ardoise, sinon nous en aurions des restes. Elle était peut-être en chaume ou en bardeaux\* de bois. Mais ces matériaux étant périssables, on ne saura probablement jamais grand-chose de sa forme ni de sa nature.

Toujours est-il que l'implantation d'une pareille toiture n'a pas laissé de trace archéologique. Il faut dire que le « couloir périphérique » situé entre les orthostates et la paroi de la fosse d'implantation fut soigneusement rebouché par les Néolithiques lorsqu'ils eurent

\* **UN BARDEAU** est une tuile de bois utilisée pour les revêtements, en particulier pour protéger les toitures des intempéries.

fini d'utiliser l'allée couverte, à l'époque de la condamnation du monument. Ce dernier était resté ouvert à l'air libre depuis presque huit siècles, avec un fond constitué de rognons de silex. Nous n'y avons trouvé que les vestiges évanescents d'une palissade, reconnaissable notamment aux traces de racines venues jadis s'y appliquer.

**Couverture étanche.** Ces différents éléments archéologiques suggèrent donc que les tables mégalithiques ont été posées tardivement. De plus, si elles avaient été en place dès l'origine, elles auraient constitué une passoire qui aurait entravé l'édification d'une couverture vraiment étanche, dont l'existence est attestée par l'état des os trouvés dans la fosse. Par conséquent les dalles de couverture ont bien été placées après les morts, dans un geste de condamnation.

La dalle de couverture la plus proche du vestibule a été ensuite déplacée, puisque nous l'avons découverte basculée. Sa chute n'eut rien d'accidentel et fut voulue. Pourquoi l'avoir enlevée si on s'était donné tant de mal pour la mettre en place ?

Nous avons découvert que ces deux opérations ont été réalisées à plusieurs siècles d'intervalle. Donc probablement par des groupes de cultures différentes. Dans le vestibule, nous avons en effet trouvé des traces de fréquentation qui correspondent à deux périodes.

Nous avons donc affaire à deux opérations de condamnation, éloignées dans

## L'œuvre de populations du Néolithique

Il y a deux siècles, les archéologues attribuaient aux Gaulois la construction des dolmens et des menhirs. On sait aujourd'hui que ces monuments mégalithiques sont bien plus anciens que les Gaulois, qui sont arrivés dans nos contrées seulement au cours du dernier millénaire avant notre ère. En réalité, les dolmens ont été édifiés par des populations du Néolithique, venues en Occident depuis l'Est au sixième millénaire avant notre ère. Ces populations paysannes connaissaient l'orge et plusieurs variétés de blé, élevaient des bœufs, des porcs, des chèvres, des moutons et avaient des chiens. Après leur arrivée, les chasseurs-cueilleurs qui

occupaient alors l'Occident se trouvèrent en position de faiblesse démographique et disparurent. Ce sont eux qui, les premiers, avaient pratiqué l'inhumation collective. Cette coutume ressurgit au Néolithique moyen, après une longue éclipse. Apparues au milieu du cinquième millénaire, les premières sépultures monumentales étaient individuelles, mais bientôt la tradition monumentale et celle de la tombe collective fusionnèrent. Dolmens, allées couvertes et sites apparentés se multiplièrent entre le cinquième millénaire et la fin du troisième millénaire, avant de s'éteindre alors que commençait l'âge du Bronze.

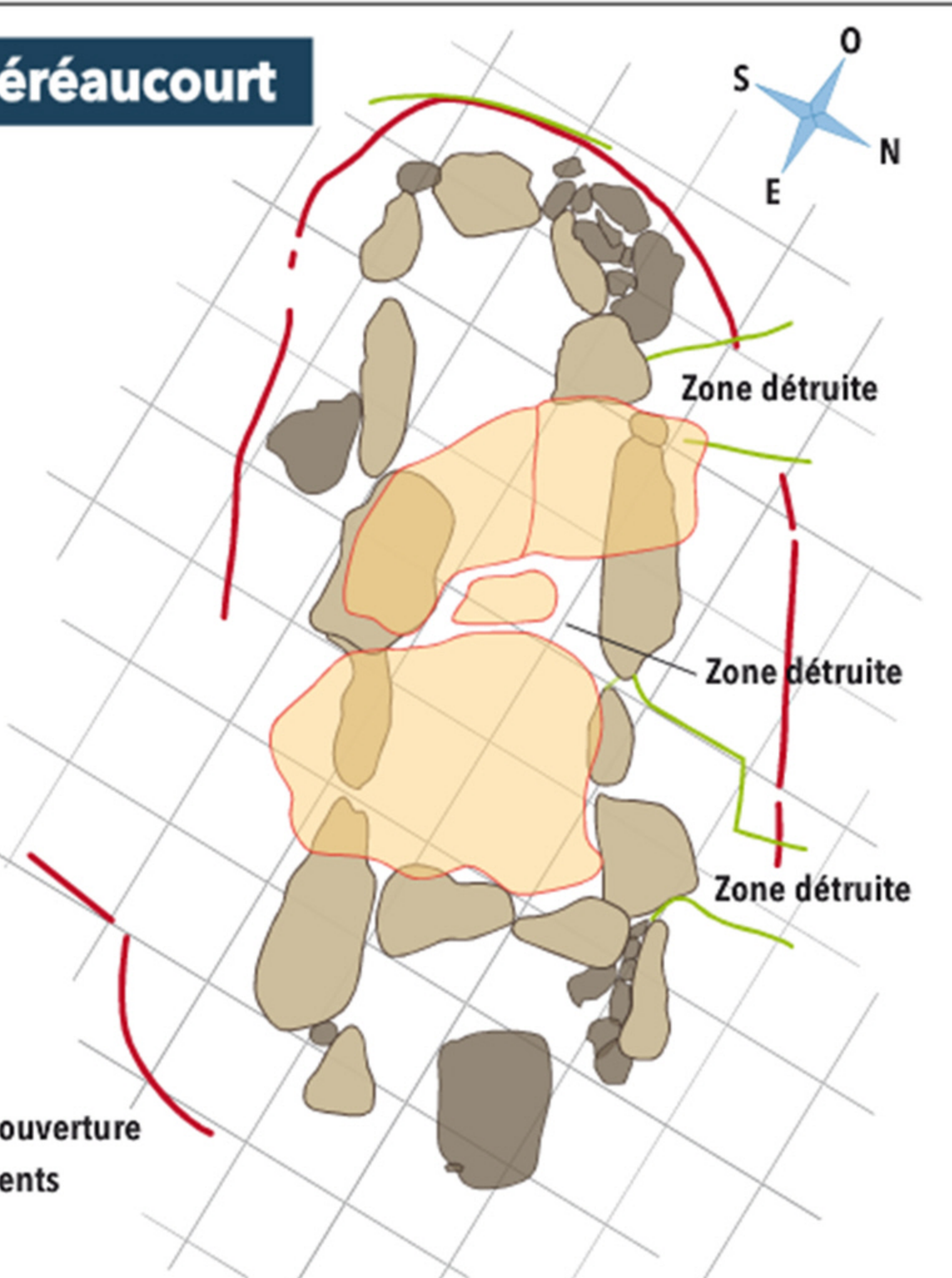


## Fig.1 L'allée de Méréaucourt

**LES CONSTRUCTEURS** de la sépulture de Méréaucourt ont disposé les pierres verticales (orthostates), soutenues par des blocs de craie, au fond d'une fosse creusée dans de l'argile contenant du silex (les lignes rouges épaisses représentent les limites de la fosse). Plus tard, l'allée mégalithique fut recouverte de dalles. Après avoir été détruites, ces dernières furent partiellement enfouies sous la terre.

© INFOGRAPHIE BRUNO BOURGEOIS

-  Orthostates
-  Autres blocs de craie
-  Projection des dalles de couverture
-  Limite verticale de sédiments
-  Arrêts des fouilles



le temps et d'esprit bien différent. La première est intervenue vers la fin des temps néolithiques, aux environs de 2400 avant notre ère. Ceux qui l'ont réalisée ont fabriqué à cette fin un sédiment particulier formé d'« argile à silex », que l'on rencontre dans les environs du monument, et de rognons de silex issus du même terrain. Ce sédiment artificiel servit à recouvrir les vestiges humains sur cinq à six centimètres d'épaisseur. On paracheva cette condamnation de façon spectaculaire par la mise en place des dalles dites de « couverture ». De cette façon, les morts étaient pour toujours séparés des vivants.

Cependant, leur souvenir restait vivace. En témoignent des traces de fréquentation dans le vestibule du monument. Ce dernier resta longtemps exposé à l'air libre. Des rognons de silex s'y trouvent profondément fendus à cause du gel, signe d'une longue succession d'hivers. À sa surface, nous avons trouvé des vestiges relevant de l'extrême fin du Néolithique, notamment deux outils en silex importé du Grand-Pressigny, dans l'Indre-et-Loire.

Bien plus tard, des hommes décidèrent de détruire partiellement le monument funéraire. La dalle brisée,

quand nous l'avons trouvée, était partiellement recouverte d'une couche ultime de sédiments ; il s'y trouvait une hache en silex poli. Une couche de condamnation analogue, dans l'allée mégalithique voisine de La Chaussée-Tirancourt, a été datée par le radiocarbone à environ – 2000 ans, vers les débuts de l'âge du Bronze. Ce serait donc au voisinage de cette date que la dalle aurait été basculée.

**Volonté de détruire.** Cette double condamnation n'est pas propre à l'allée de Méréaucourt puisqu'elle a également été observée à La Chaussée-Tirancourt et à Changé, en Eure-et-Loir. Très brutale, la seconde condamnation visait à détruire, autant que possible à effacer. De mauvais traitements furent infligés aux dalles de couverture, puis des sédiments ont recouvert la plus grande partie de ce qui était resté visible.

La raison de cette destruction demeure inconnue. Elle pourrait par exemple refléter une évolution religieuse, ou correspondre à une punition infligée par un peuple vainqueur suite à une bataille. Ce geste est en tout cas loin d'être isolé. À La Chaussée-Tirancourt, par exemple, 32 kilomètres au nord, c'est par le feu que

l'on fit éclater de magnifiques orthostates en grès. Plusieurs allées sépulcrales en bois furent incendiées, notamment celle de Wandersleben, en Allemagne. C'est aussi le cas de celle de La Croix-Saint-Ouen, découverte plus récemment, et de celle de Longueil-Sainte-Marie, toutes deux situées dans l'Oise. Dans d'autres sites, les dalles ont été simplement enfouies sous la terre.

Même si ces considérations ne s'appliquent strictement qu'à l'allée de Méréaucourt, nous les croyons généralisables à l'ensemble des monuments de ce type. Ils sont nombreux : on en connaît une soixantaine dans le seul Bassin parisien, et il y en a bien d'autres en Allemagne. S'y ajoutent tous ceux qui avaient été construits en bois, ignorés de nos prédécesseurs mais qu'on commence à reconnaître de nos jours, par exemple à Bazoches-sur-Vesle, dans l'Aisne, et, je l'ai dit, à La Croix-Saint-Ouen.

Peut-on étendre ces conclusions aux allées couvertes qui n'étaient pas enterrées ? Rien n'y oblige, rien ne l'interdit. Quant à l'immense et multiforme famille des dolmens sans ou sous tumulus, elle se prête encore moins à une généralisation.

Pourtant, l'archéologue Dominique Jagu a observé dans un dolmen d'Eure-et-Loir un phénomène évoquant ceux constatés à Méréaucourt : les sommets des orthostates y ont été volontairement détruits, en lien avec l'élimination d'une dalle de couverture. Dans ce domaine, les observations restent malheureusement rarissimes. Les fouilles, anciennes, n'ont pas pris en compte la problématique des dalles de couverture. Et des fouilles programmées de sépultures collectives, comme le fut celle de Méréaucourt, sont exceptionnelles. ■

[1] C. Masset et al., *Gallia Préhistoire*, 55, 73, 2013.

### Pour en savoir plus

- J. Guilaine (dir.), *Mégalithismes, de l'Atlantique à l'Éthiopie*, Errance, 1999.
- C. Masset, *Les Dolmens, sociétés néolithiques et pratiques funéraires*, 1997.
- C. Masset et P. Soulier (dir.), *Allées couvertes et autres monuments funéraires du Néolithique dans la France du Nord-Ouest*, Errance, 1995.



# Dettes publiques et croissance : des erreurs bien choisies

Une dette publique de plus 90 % du produit intérieur brut entraîne la récession. C'est en tout cas ce qu'affirmaient en 2013 deux économistes de l'université Harvard. Sauf qu'ils ont accumulé les erreurs.



**PAR Pablo Jensen ET Antoine Parent,** membres de l'Institut rhônalpin des systèmes complexes et chercheurs respectivement à l'École normale supérieure de Lyon et à l'Institut d'études politiques de Lyon. © DR

## L'essentiel

➤ **SELON UNE ÉTUDE** réalisée par deux économistes américains, il existe un seuil d'intolérance à la dette au-delà duquel un pays entre en récession.

➤ **UN ÉTUDIANT EN ÉCONOMIE** révèle l'erreur de calcul, des chercheurs démontrent que ledit seuil n'existe pas.

➤ **LES DEUX EXPERTS** se sont trompés en cherchant coûte que coûte à apporter la preuve empirique que lorsque la dette publique augmente, elle finit toujours par obérer la croissance.

**J**anvier 2013, Carmen Reinhart et Kenneth Rogoff, deux économistes en vue, professeurs à l'université Harvard de Cambridge, aux États-Unis, présentent une étude sur le lien entre la dette publique\* et la croissance économique lors de la conférence annuelle de l'Association américaine d'économie. Un résultat marque particulièrement les esprits : les deux auteurs affirment que la croissance du Produit intérieur brut (PIB)\* d'un pays chute brusquement – passant de 3 % environ à - 0,1 % en moyenne, dès que le rapport entre la dette de ce pays et son PIB dépasse le seuil de 90 % [fig. 1]. Il y aurait donc une forme d'« intolérance à la dette ».

Pour parvenir à cette conclusion, les deux auteurs ont commencé par recueillir les chiffres de croissance économique et de dette pour une quarantaine de pays sur deux cents ans [1]. Puis, ils ont extrait de ces données une analyse portant sur vingt pays développés durant soixante-quatre ans, pour la période 1946-2009, laquelle a révélé ce seuil de 90 %. Et ils l'ont publiée dans l'*American Economic Review*, une des plus prestigieuses revues d'économie au monde [2].

La notion d'intolérance à la dette, largement médiatisée par Carmen Reinhart et Kenneth Rogoff eux-mêmes, a immédiatement un fort

impact sur les décideurs politiques. Ainsi, dans une lettre officielle envoyée le 13 février 2013 à tous les gouvernements de l'Union européenne, le vice-président de la commission, Olli Rehn, utilise leur étude pour justifier les politiques d'austérité prônées en Europe. Il écrit : « *Après la crise, la dette publique dans l'Union européenne est passée de 60 % à 90 % du PIB. Et il est largement admis, suite à des recherches sérieuses, que lorsque les niveaux de dette dépassent 90 %, ils tendent à exercer un impact négatif sur les dynamiques économiques, ce qui se traduit par une faible croissance pendant plusieurs années.* »

**Anomalie statistique.** Étant donné l'importance du résultat, plusieurs chercheurs en économie tentent de confirmer l'existence de ce seuil [3]. Immédiatement, des doutes surgissent, car les calculs des deux auteurs

**\*LA DETTE PUBLIQUE** est l'ensemble des engagements financiers pris sous forme d'emprunts par l'État, les collectivités publiques et les organismes de Sécurité sociale.

**\*LE PRODUIT INTÉRIEUR BRUT (PIB)** est un indicateur qui quantifie la valeur totale des richesses produites par les agents économiques (ménages, entreprises, administrations publiques) d'un pays.

**\*LA MÉDIANE** est une valeur qui permet de partager en deux parts égales une suite de données.





**Kenneth Rogoff et Carmen Reinhart, professeurs d'économie à Harvard, ont publié en 2009 un ouvrage salué par la presse internationale, primé et traduit en dix langues, *This Time is Different*, qui retrace huit cents ans de crises financières.**

présentent une anomalie statistique élémentaire. En effet, alors que pour les taux d'endettement inférieurs à 90 %, la moyenne et la médiane\* des différents taux de croissance du PIB des pays sont assez proches, ces deux grandeurs sont très différentes au-delà du seuil. Or, il n'y a aucune raison à cela.

Cela fait penser à un problème d'échantillonnage, c'est-à-dire à la présence de données aberrantes, peu comparables aux autres parmi les différents taux de croissance du PIB. Mais comment le vérifier alors que les deux auteurs refusent de communiquer les données qu'ils ont rassemblées et ce malgré plusieurs relances ? En effet, personne ne peut reproduire leurs

calculs car, même si cela peut paraître surprenant, il n'existe pas de base de données publique partagée par l'ensemble des économistes sur la croissance et la dette, même pour les pays développés.

**Données effacées.** Avril 2013, Thomas Herndon, étudiant en économie à l'université du Massachusetts, parvient à convaincre les auteurs de lui communiquer ces fameuses données. Et la bombe éclate : dans l'article mis en ligne sur le site de son laboratoire, il met en évidence des erreurs et des choix très discutables qui invalident le résultat le plus important des deux auteurs, l'existence du seuil à 90 % [4]. En effet, une fois corrigée de ces erreurs, la croissance ne passe plus de

3 % à -0,1 % lorsqu'on franchit le seuil de 90 %, mais seulement de 3 % à 2,2 %, écart peu significatif.

Une première erreur relevée par Thomas Herndon est élémentaire : une manipulation du tableau Excel qui a servi à faire tous les calculs, a effacé les données des cinq premiers pays dans l'ordre alphabétique (Australie, Autriche, Belgique, Canada et Danemark). La deuxième erreur est un peu plus subtile : il s'agit d'une méthode de calcul de la moyenne très contestable. Enfin, la troisième « erreur » est plus ambiguë : elle tient à l'exclusion volontaire de certaines données jugées non représentatives par les deux auteurs.

Revenons sur ces deux derniers points. Pour leur calcul, les auteurs ont divisé le ratio « dette sur PIB » en quatre tranches : 0-30 %, 30-60 %, 60-90 % et plus de 90 %. Et ils ont rangé par tranche toutes les années où un pays s'y trouve en notant à chaque fois les taux de croissance de son PIB. Ensuite, pour savoir quelle est la moyenne des taux de croissance du PIB pour >>>

© MARY F. CALVERT / THE NEW YORK TIMES-REDUX-REA; FERNANDO ARIZA / THE NEW YORK TIMES-REDUX-REA



# Dettes publiques et croissance : des erreurs bien choisies

►►► une tranche donnée, ils auraient dû faire la somme de tous ces taux de croissance – pour toutes les années et tous les pays – et la diviser par leur nombre : en effet, tout étudiant sait que pour calculer la valeur moyenne d'une série, on fait la somme de toutes les valeurs de la série puis on divise cette somme par leur nombre. Or au lieu de cela, les deux auteurs ont calculé dans chaque tranche la moyenne des taux de croissance du PIB par pays, puis ils ont fait la moyenne entre les valeurs obtenues pour chaque pays. Ce qui fausse considérablement les résultats.

**Moyenne faussée.** Ainsi, la Nouvelle-Zélande apparaît une seule année dans la catégorie « plus de 90 % de dette » (en 1951), avec une croissance du PIB de - 7,6 %, alors que la Grèce y apparaît pendant dix-neuf années, pendant lesquelles sa croissance moyenne a été de + 2,9 %. En calculant d'abord la croissance moyenne du PIB par pays, ils aboutissent donc à une croissance moyenne pour cette tranche de « - 2,35 % » (en ne

considérant que ces deux pays), alors que si on calcule la moyenne directement le résultat est très différent, proche de + 2,4 %. En effet dans ce cas, en supposant que l'on n'ait que ces deux pays, le poids des dix-neuf années de la Grèce (1991-2009) sur les vingt années considérées dans cet exemple devient prépondérant. Un étudiant aurait du mal à justifier devant ses professeurs un calcul aussi étrange, qui donne autant de poids à un court épisode d'une année de croissance négative pour un pays qu'à deux décennies de croissance positive pour un autre. Pour justifier ce choix, les auteurs se contentent pourtant d'un « *c'est habituel de faire ainsi* », dans une réponse aux critiques formulées par Thomas Herndon, parue dans le *New York Times* du 25 avril 2013.

Enfin, la moyenne de la case « plus de 90 % de dette » est encore plus affectée par leur troisième « erreur », celle qui a consisté à effacer volontairement des données. Les auteurs ont en effet choisi de calculer la moyenne de la croissance du PIB en éliminant une partie des

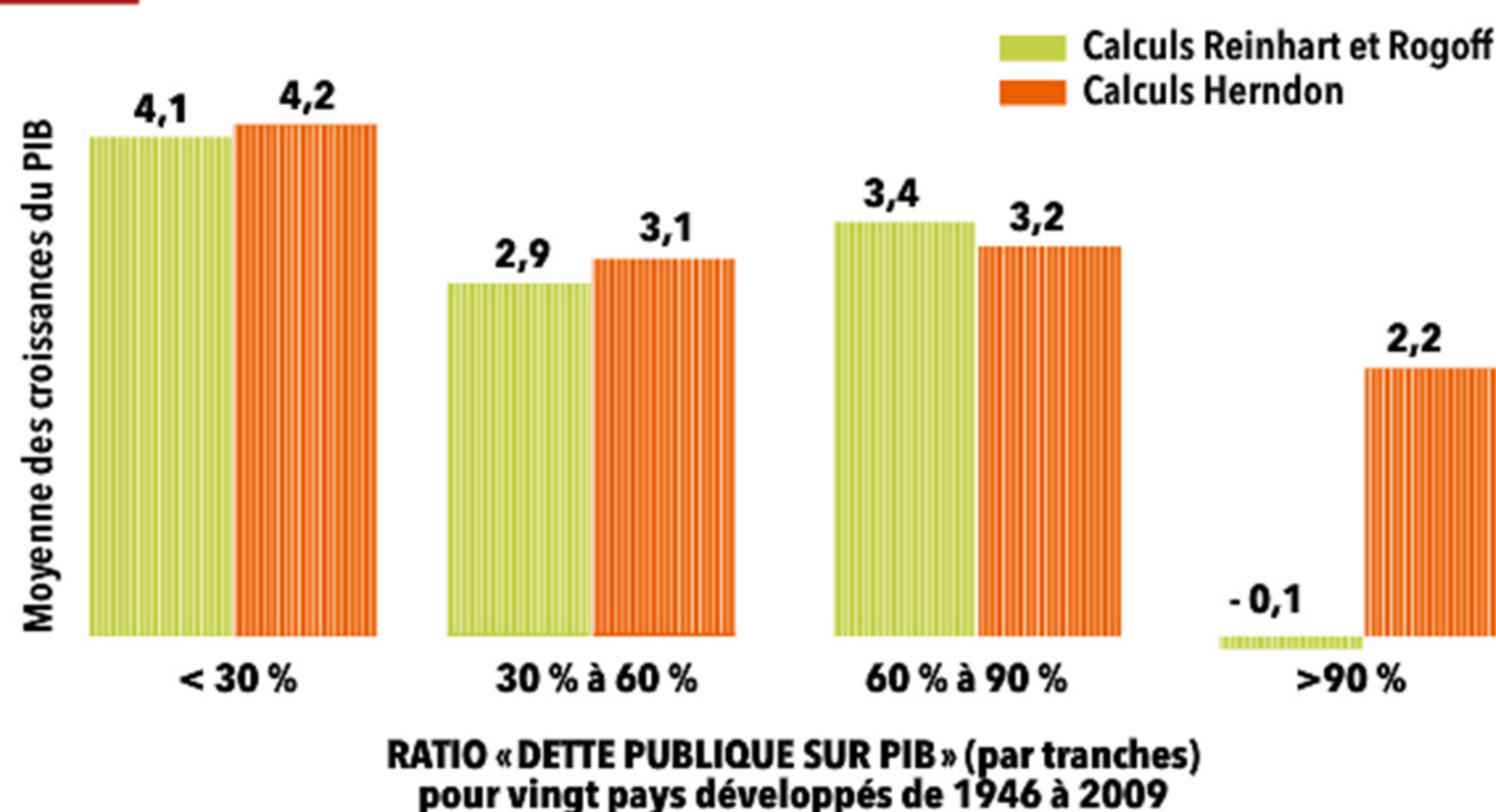
données disponibles. En soi, une telle pratique est courante et parfois justifiée par les besoins de la modélisation. Cependant, dans leur article, ils semblent écarter systématiquement les valeurs qui contredisent leur message. Ainsi, ils ont décidé d'exclure quatre années pendant lesquelles la Nouvelle-Zélande était dans la catégorie de plus de 90 % de dette, mais où sa croissance était très forte. En les gardant, on aurait obtenu une croissance moyenne de 2,6 % pour ce pays, au lieu des - 7,6 % trouvés en ne gardant que l'année 1951.

On peut s'étonner que la communauté académique n'ait pas soulevé les questions qui d'ordinaire sont posées par tout examinateur d'un article dans une revue même mineure : la corrélation tient-elle toujours si on introduit d'autres variables pertinentes (lire « Corrélation ne signifie pas causalité », p. 67) ? Ces résultats sont-ils robustes pour une autre période et un autre échantillon de pays ? Quelle est la signification économique d'un seuil obtenu en dehors de toute modélisation économique du lien entre dette et croissance ? Et la causalité n'est-elle pas plus plausible dans l'autre sens, expliquant la dette par une faible croissance ?

**Aveuglement des auteurs.** Sur cette dernière question, une première manière de répondre consiste à corréliser le niveau de dette avec l'évolution future ou passée de la croissance. Une étude préliminaire publiée sur le Web par Arindrajit Dube, économiste à l'université du Massachusetts, montre que la dette est plus fortement corrélée à la croissance passée qu'à celle à venir. Ce pourrait donc être le manque de croissance qui entraîne une augmentation de la dette, et non le contraire.

Finalement, comment des universitaires aussi expérimentés, occupant des postes aussi prestigieux ont-ils pu publier, dans une des meilleures revues d'économie, un article aussi médiocre sur un sujet aussi important ? La fraude délibérée semble peu plausible, ne serait-ce que parce que les chercheurs ont finalement consenti à envoyer leurs données. Il semblerait plutôt qu'il

**Fig.1 Croissance et endettement**



**LA MOYENNE DES CROISSANCES DU PIB** calculée par Carmen Reinhart et Kenneth Rogoff indique, à tort, une chute brutale à - 0,1 % lorsque le ratio dette sur PIB dépasse 90 %. L'erreur de calcul a été révélée par Thomas Herndon. SOURCE : C. REINHART ET K. ROGOFF, *AMERICAN ECONOMIC REVIEW: PAPERS & PROCEEDINGS*, VOL. 100, 2010 - THOMAS HERNDON ET AL., *CAMB. J. ECON.*, 38, 257, 2014.





**Au Portugal, en mai 2013, des militantes anti-austérité demandent le renvoi du ministre des Finances alors qu'il participe à une présentation du livre de Carmen Reinhart et Kenneth Rogoff, *This Time is Different*.**

s'agisse d'un aveuglement causé par la tentation de confirmer un *a priori* théorique fermement ancré dans la tête de nombreux économistes classiques...

L'idée reçue est que les agents économiques analyseraient la dette publique comme un indice d'imposition future : ils contracteraient donc volontairement leurs dépenses pour pouvoir payer ces impôts à venir, ce qui finirait par réduire la consommation et donc la croissance quand le niveau de la dette augmente. La récession prédite par cette théorie pour des hauts niveaux de dette publique est *in fine* une hypothèse sous-entendue dans l'article de Carmen Reinhart et

Kenneth Rogoff, comme si elle faisait l'objet d'un consensus auprès de tous les économistes.

Lorsque l'on part avec un tel *a priori*, on peut traiter les données en choisissant celles qui confortent les intuitions et les préjugés, plutôt que d'autres qui semblent tout aussi légitimes. Ainsi, comme on l'a signalé précédemment, Carmen Reinhart et Kenneth Rogoff ont choisi de tracer la croissance en fonction de la dette et non le contraire, qui aurait suggéré la causalité inverse. Ils ont utilisé une méthode étrange de calcul de la moyenne – par pays – qui renforçait leurs conclusions. Enfin, ils ont choisi de grouper les valeurs du ratio « dette sur

PIB » en quatre tranches, au lieu d'utiliser les chiffres bruts, ce qui leur a permis de mettre en scène un seuil au-delà duquel la croissance s'effondrerait.

Il est important de souligner que de telles transformations, qui permettent de donner du sens au monde, ne sont pas des distorsions forcément coupables, mais au contraire les conditions indispensables pour faire de la science, comme l'ont montré des travaux en sociologie des sciences. Il faut l'accepter mais aussi créer les conditions pour que la communauté scientifique puisse mettre à l'épreuve les résultats obtenus, aussi prestigieux soient leurs auteurs.

**Esprit critique.** Revenons pour finir à deux leçons que l'on peut tirer de l'« affaire Reinhart et Rogoff ». La première, positive, est que grâce à quelques chercheurs qui ont conservé leur esprit critique et pris au sérieux l'idée de reproductibilité en économie, l'erreur est débusquée et l'honneur scientifique est sauf. Cependant, la seconde leçon, si l'on considère l'élite des économistes, a de quoi inquiéter. En effet, alors qu'on aurait pu s'attendre à ce que la mise en évidence des erreurs élémentaires commises par les deux auteurs ait compromis leur carrière, la dernière conférence de l'Association américaine d'économie organisée en janvier 2014 a conforté la place de ces deux chercheurs, les invitant à cinq sessions, dont une table ronde sur... l'austérité ! De quoi désespérer sur la capacité de la communauté des économistes classiques à se remettre en question. ■

## Corrélation ne signifie pas causalité

Une erreur élémentaire consiste à penser qu'un coefficient de corrélation élevé entre deux variables entraîne l'existence d'une relation de causalité entre elles. De nouveaux modèles, tel celui proposé en 2011 par trois économistes de la Banque des règlements internationaux, Stephen Cecchetti, Madhusudan Mohanty et Fabrizio Zampolli, analysent le lien entre dette publique et croissance, en prenant en compte d'autres facteurs [1]. Car la croissance économique dépend en fait d'un grand nombre d'éléments, dont la croissance de la population, le ratio de l'investissement sur le PIB, le niveau d'éducation de la population... Ces modèles mettent en lumière la faiblesse méthodologique de la démarche qui cherche à corréler dette publique et croissance du PIB, sans conclure pour autant qu'il n'existe aucun lien entre ces deux indicateurs. Cependant, tous ces travaux soulignent l'inanité d'un seuil critique unique, au-delà duquel la croissance chuterait brutalement.

[1] S. Cecchetti et al., *BIS Working Papers*, 352, 2011, [www.bis.org/publ/work352.pdf](http://www.bis.org/publ/work352.pdf).

[1] C. Reinhart et K. Rogoff, *This Time is Different: Eight Centuries of Financial Folly*, Princeton Press, 2009.

[2] C. Reinhart et K. Rogoff, *American Economic Review: Papers & Proceedings*, 100, 2010.

[3] A. Minea et A. Parent, *WP AFC* 12-08, 2012.

[4] Thomas Herndon et al., *Camb. J. Econ.* 38, 257, 2014.

### Pour en savoir plus

► Bruno Latour, *Enquête sur les modes d'existence*, La Découverte, 2012.

► Stephen Jay Gould, *La Mal-mesure de l'homme*, Odile Jacob, 1997.

► Bruno Latour, *Petites Leçons de sociologie des sciences*, Points Seuil, 1996.





© CERN

**Fabiola Gianotti** est née en 1962 à Turin. Elle est docteure en physique des particules de l'université de Milan. Depuis 1987 au CERN, elle a travaillé sur les expériences UA2, puis ALEPH sur l'accélérateur LEP et Atlas sur le LHC. Membre de l'Académie italienne des sciences, elle a fait partie du conseil scientifique du CNRS, et du comité scientifique du Fermilab, laboratoire américain de physique des particules. Elle est depuis 2013 membre du Comité consultatif scientifique de l'Organisation des Nations unies (ONU).

# « Annoncer le boson de Higgs a été une émotion indescriptible »

Après avoir eu le privilège de communiquer la découverte du très recherché boson de Higgs, Fabiola Gianotti vient d'être nommée au Comité consultatif scientifique de l'ONU.

« **I**l m'a fallu du courage, mais c'était un immense privilège ! » Ce 4 juillet 2012, à l'Organisation européenne pour la recherche nucléaire (CERN), à Genève, dans l'amphithéâtre débordant de physiciens, une femme gracile à la chevelure ébène, chandail rouge, s'avance. Et se lance avec passion dans une présentation très attendue : c'est à Fabiola Gianotti, 52 ans, alors porte-parole de l'expérience Atlas installée sur le Grand Collisionneur de hadrons (LHC), qu'est revenu l'honneur d'exposer la « découverte probable » du boson de Higgs, proposé théoriquement cinquante ans plus tôt et dont l'existence était nécessaire à la cohérence de la physique des particules.

Cette annonce confirmait la révélation similaire faite quelques minutes avant, avec autant de prudence, par Joe Incandela, porte-parole de CMS, autre grande expérience du LHC. Les deux instruments, de conception différente, avaient obtenu des résultats identiques ! Sous les hourras, la physicienne a ressenti « une émotion forte, indescriptible ».

Son univers à elle, Fabiola Gianotti le décrit dans son banal bureau partagé avec Peter Jenni, son prédécesseur à la tête d'Atlas. Elle est cette fois vêtue d'un pull vert pomme, autre teinte qui se marie

bien avec son caractère enjoué. « J'ai hérité de mon père géologue une insatiable curiosité pour le monde qui nous entoure. En promenade, nous examinons chaque fleur. » De sa mère, elle tient un goût affirmé pour le piano : à 21 ans, elle a décroché un diplôme professionnel au conservatoire de Milan.

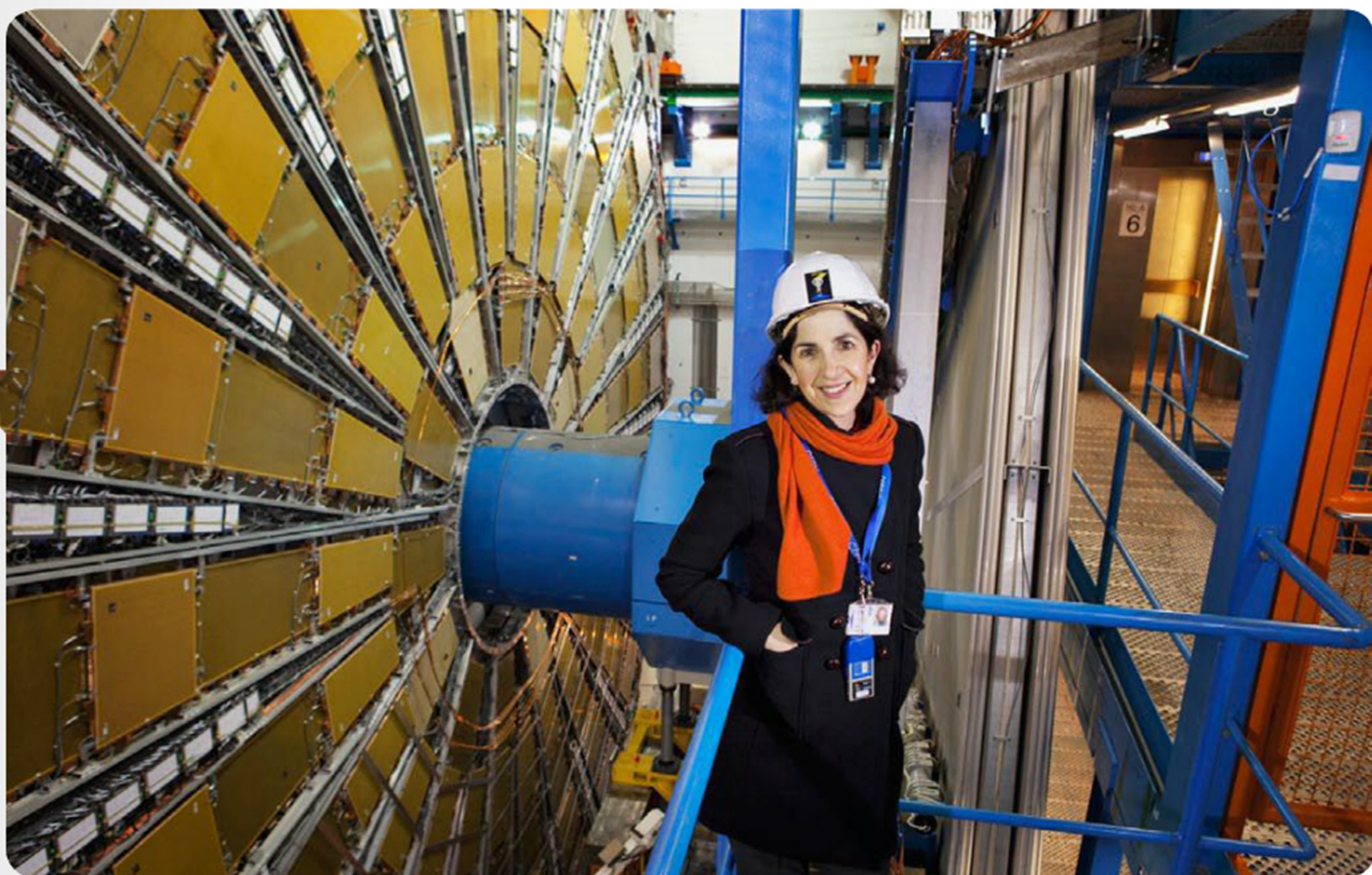
**Questions philosophiques.** Comment une musicienne, qui plus est issue d'un parcours classique en latin et en grec, s'est-elle retrouvée à jongler avec les particules lors d'un doctorat en physique subnucléaire à l'université de Milan ? « Les grandes questions de la philosophie m'ont toujours titillée ; gamine, je me demandais pourquoi les étoiles ne nous tombaient pas sur la tête. Or la possibilité qu'of-

frait la physique d'y répondre m'a davantage convaincu », dit-elle, en soulignant le rôle initiatique crucial, entre 16 et 18 ans, joué par son professeur de sciences.

De l'enthousiasme, de l'optimisme et de la ténacité, cette adepte de course à pied en a aussi à revendre. « Elle est empathique, proche des gens, souligne Peter Jenni. Sainement ambitieuse et déterminée, elle s'impose une rigueur scientifique exemplaire. » « Brillante, elle s'engage parfois si fort qu'on a peur qu'elle en fasse trop, abonde Rolf Heuer, directeur général du CERN. Je lui ai rappelé

**Fabiola Gianotti est la première femme élue porte-parole de l'équipe Atlas**





*de garder en tête qu'elle doit durer... Et de faire attention à sa santé ! Mais ces traits l'ont conduit aussi à la tête d'Atlas, où elle a montré une capacité de direction humaine et scientifique remarquable. »*

Élue « porte-parole » en 2009, soit *prima inter pares* de l'équipe Atlas – et première femme à accéder à un tel poste –, Fabiola Gianotti coordonnait le travail de 3 000 physiciens issus de 38 pays. « Je devais suivre l'expérience, de la prise de données à l'approbation des résultats. Chaque jour, je discutais de ce qui avait été accompli la veille et du programme à venir, je traitais les problèmes rencontrés et les manières d'y faire face », qu'ils aient été d'ordre technique et stratégique, mais aussi financier voire personnel. « Ma position n'était ni hiérarchique ni dominante. Les décisions ont été prises collégialement. C'était simplement à moi, au final, de parler au nom de tous. »

Selon Peter Jenni, il faut, pour assurer cette fonction, très bien connaître tous les niveaux d'une entreprise comme Atlas, d'une incomparable complexité : cet instrument de 7 000 tonnes contient une dizaine de sous-détecteurs, 3 000 kilomètres de câbles et 100 millions de canaux électroniques pour repérer le millier de particules produites lors de chaque collision. Or, arrivée au CERN en 1987 comme doctorante, Fabiola Gianotti a travaillé sur ce projet depuis sa conception, dans les années 1990 : elle a pris part

à la mise au point du calorimètre à argon liquide, l'un des détecteurs de particules. Puis elle a contribué à établir le potentiel de découvertes d'Atlas.

**Accident sur l'accélérateur.** A-t-elle apprécié ce rôle de « cheffe » ? « Oui, dit-elle avec reconnaissance. Nous étions dans la phase critique de relance du LHC. On ne savait pas si tout fonctionnerait à nouveau comme prévu. » En septembre 2008 en effet, dix jours après le démarrage du LHC, un accident sur l'accélérateur avait imposé son arrêt pour des mois. « Nous avons vécu des moments de blues terribles, car nous étions prêts. C'était comme si tout s'effondrait : les attentes de vingt ans de travail, l'enthousiasme des derniers jours... Mais ces sentiments ont peu duré, je suis de nature positive », précise-t-elle. Dès 2009 alors, avec enfin les premières collisions de protons, « nous avons vu surgir avec excitation, l'une après l'autre, toutes les particules identifiées par le passé », poursuit-elle. Et enfin, en point d'orgue, le tant attendu boson de Higgs.

« Dans cette phase de tension, il était important pour moi d'avoir une totale confiance en elle, dit Joe Incandela, alors porte-parole de l'expérience CMS, concurrente d'Atlas. Car gérer la pression au sein de nos équipes respectives était déjà assez difficile, tant les fuites précoces et involontaires pouvaient être préjudiciables à tous. Or j'ai trouvé en Fabiola une homologue honnête et intègre, >>>

**Fabiola Gianotti a coordonné le travail des 3 000 physiciens impliqués dans l'expérience Atlas, dispositif central du Grand Collisionneur de hadrons, au CERN, jusqu'à l'annonce officielle de la découverte du boson de Higgs le 4 juillet 2012.**



Fabiola Gianotti



© CERN

### Son Laboratoire

Fabiola Gianotti est employée par l'Organisation européenne pour la recherche nucléaire (CERN), à Meyrin près de Genève, qui fête ses 60 ans cette année. En tant que porte-parole de l'expérience Atlas installée sur l'accélérateur LHC, elle a coordonné entre 2009 et début 2013 le travail de quelque 3 000 chercheurs de 177 institutions de 38 pays. Depuis cette année, elle est redevenue simple membre de ce vaste collectif scientifique.

### Ses publications

Fabiola Gianotti a signé une vingtaine d'articles scientifiques de physique des particules dans des revues spécialisées en tant qu'auteure principale ou comme unique chercheuse. Elle est coauteure de plus de 500 articles. Elle donne chaque année des conférences publiques, et consacre beaucoup de temps à répondre aux questions d'écoliers ou d'étudiants, notamment sur Skype.

» au caractère bien trempé, en plus d'une amie. »

La physicienne se souvient aussi de cette période stressante, en juin 2012, durant laquelle ses qualités personnelles l'ont aidée : « Il fallait enregistrer et analyser les données avec efficacité, car elles étaient déterminantes pour corroborer l'existence du signal du boson de Higgs, et avec rapidité, car l'échéance approchait d'une importante conférence où l'on attendait ces résultats. Et moi, je ne devais pas perdre ma lucidité dans la gestion de l'ensemble, malgré la tension et un déficit de sommeil. »

**Supersymétrie et matière noire.** Comme Joe Incandela, Fabiola Gianotti vient de passer son flambeau de porte-parole. Mais elle reste active au sein d'Atlas. « Les derniers mois, j'ai travaillé à l'écriture d'un article sur les propriétés du boson de Higgs. Je participe aussi à la préparation de la prochaine phase d'acquisition de données », détaille-t-elle. Loin d'être déçue, comme certains de ses collègues, de n'avoir pour l'instant découvert « que » cette fameuse particule, elle se réjouit des surprises à venir au LHC dès 2015.

Notamment, peut-être, celles concernant la supersymétrie, théorie affirmant que chaque particule connue possède un double – une superparticule – si massif qu'aucun n'a pour l'heure été découvert. Ou d'autres touchant à la « matière noire », entité de nature mystérieuse qui emplit le quart de l'Univers. « Avec le boson de Higgs, nous avons fait un pas de géant, mais ce que nous connaissons n'est rien en regard de ce qu'il reste à découvrir. »

Elle qui se dit « timide et réservée » a dû se faire un peu violence depuis 2012. Car après sa prestation mondialement suivie du 4 juillet, elle a continué à être remarquée. Ainsi, ce samedi soir de mars 2013, seule femme avec sa longue robe vermeille parmi la pléthore de collègues en queue-de-pie lors de la remise des Prix de physique fondamentale, créés par le milliardaire russe Yuri Milner et dotés chacun de 3 millions de dollars, dont elle était l'une des lauréates avec ses pairs du CERN. Fidèle à elle-même, elle a commencé par partager ces honneurs avec ses milliers de collaborateurs. Et la somme du prix a été utilisée pour créer des bourses pour de jeunes chercheurs.

Fin 2012, elle était déjà en couverture du magazine américain *Time*, sélectionnée parmi ses personnalités de l'année. « Les médias cherchent de plus en plus à mettre en évidence des scientifiques. Même si ce qu'on fait est le fruit du travail de milliers de chercheurs, c'est positif, cela montre l'intérêt de la

société pour ce domaine », répond-elle. Et d'admettre que son statut de femme active dans un secteur professionnel largement masculin – 70% des scientifiques européens sont des hommes, un taux encore plus élevé en physique – a probablement joué un rôle dans l'intérêt qui lui a été porté.

« Fabiola est restée elle-même, n'a jamais ni forcé ou ni affadi sa féminité dans ce monde d'hommes », coupe Joe Incandela. « Jadis, ajoute Peter Jenni, d'aucuns ont avancé que le fait de nommer une physicienne à la tête d'Atlas était lié à la visibilité médiatique qu'elle engendrerait inévitablement. Mais Fabiola avait les compétences, tout le monde le reconnaît. Elle a aussi pu faire la promotion des femmes dans la science. »

De son côté, l'intéressée confirme n'avoir « rien expérimenté de particulier à ce qu'une femme dirige un si grand projet ». Celle qu'a fascinée, à 17 ans, la lecture de la vie de Marie Curie espère que son expérience « montre à toutes les femmes qu'il leur est possible de suivre des voies scientifiques ». Mais pour cela, elle convient, même si elle-même n'a pas d'enfants, qu'« il s'agit de créer davantage de structures sociales pour rendre ces carrières compatibles avec la vie privée. Et avant, il ne faudrait pas contraindre les jeunes, durant leurs études obligatoires, à se décider trop tôt pour une voie, scientifique ou littéraire ».

Il y a peu, sa notoriété et son parcours ont conduit Fabiola Gianotti à être choisie au Comité consultatif scientifique de l'ONU. Cet organe, nouvellement créé, regroupe 26 experts de divers domaines et a pour tâche de conseiller le Secrétaire général de l'ONU

## Le progrès a lieu grâce aux idées générées par la recherche fondamentale

sur les questions relatives aux sciences mises au service du développement durable. Sa première séance s'est tenue fin janvier, à Berlin. Quel message y a-t-elle défendu ? « L'importance de la recherche fondamentale : le progrès a lieu grâce aux idées révolutionnaires qu'elle génère. Le transfert de technologies peut aider à résoudre des problématiques de développement, mais la science de base devrait concerner tout le monde, même si son utilité n'est pas immédiate. Chacun de nous n'est-il pas curieux de savoir d'où il vient ? De comprendre notre Univers ? Cesser de financer l'art et la connaissance, c'est nier les aspirations fondamentales de l'homme. » Et de faire un clin d'œil à ses amours littéraires en citant le poète italien Dante : « Pensez à ce que vous êtes. Point n'avez-vous été faits pour vivre comme des brutes, mais pour rechercher la vertu et la connaissance. » ■ Olivier Dessibourg



Historia



Quelle Histoire  
EDITIONS

PRÉSENTENT

# ULYSSE

APPLICATION DISPONIBLE LE 10 AVRIL

Disponible sur  
**App Store**

DISPONIBLE SUR  
**Google play**

amazon  
apps  
Disponible sur  
**amazon**

3 €  
59



## L'ODYSSÉE D'ULYSSE UNE APPLICATION SANS ÉQUIVALENT

L'Odyssée d'Ulysse racontée aux enfants... Une histoire fascinante pour découvrir la fabuleuse épopée du plus célèbre des héros grecs. De la petite île d'Ithaque à la grotte du Cyclope en passant par la guerre de Troie, le beau voyage d'Ulysse ouvre un univers magique idéal pour aller à la rencontre des dieux, des monstres et des héros mythologiques !

15 TABLEAUX ANIMÉS • LA CARTE DE L'ODYSSÉE • DES JEUX • LES PRINCIPAUX DIEUX





## Quelques questions du public

- Quel sort pour les substances que le PNSE 3 jugera prioritaires ?
- Quels liens entre cet outil et le règlement REACH ?
- Que recouvre concrètement le terme d'expert ?
- La réglementation sur l'eau potable doit-elle évoluer ?
- Où en est la santé des abeilles ?

Rencontre organisée sur le Campus Scientifique et Technique du groupe Colas à Magny-les-Hameaux (Yvelines).

Santé & Environnement

## Sur quelles substances toxiques agir en priorité ?

L'Institut national de l'environnement industriel et des risques (INERIS) a mis au point un outil d'aide à la décision qui hiérarchise les produits chimiques préoccupants. Son développement a impliqué des acteurs de la société civile.

**P**esticides, dioxines, bisphénol A, PCB, métaux lourds... Des centaines de substances toxiques pour l'Homme et l'environnement peuvent se retrouver dans l'eau, l'air et nos aliments. Les autorités font donc face à une question récurrente : parmi tous ces produits chimiques, sur lesquels faut-il agir en priorité pour en réduire les expositions ? Une question d'ailleurs posée noir sur blanc par le deuxième Plan National Santé Environnement 2009-2013... et que devra trancher le troisième PNSE prévu pour septembre 2014, en fixant une liste de substances prioritaires pour les cinq prochaines années.

Dans cette optique, les pouvoirs publics ont sollicité l'Institut national de l'environnement industriel et des risques (INERIS). Sa mission : développer une méthode permettant de hiérarchiser les toxiques les plus préoccupants. Un travail mené dans le cadre du deuxième PNSE, en concertation avec divers experts scientifiques et techniques, mais aussi avec la CORE (Commission d'Orientation de la Recherche et de l'Expertise) qui inclut des acteurs issus de la société, telle la fédération France Nature Environnement (voir encadré). Conçue comme un véritable outil d'aide à la décision, cette méthode a été présentée devant un large public le 27 mars dernier, lors

d'une rencontre scientifique organisée par la société Colas en partenariat avec « La Recherche ».

Principal point fort de cet outil : il intègre la diversité des points de vue sur la notion de substance « préoccupante ». Car, en réalité, il n'existe pas de définition absolue. Degré de dangerosité, nombre de maladies attribuables, population totale exposée, existence de personnes sensibles, persistance dans l'environnement, bioaccumulation au fil de la chaîne alimentaire... : plusieurs critères peuvent entrer en ligne de compte et chacun ne leur accorde pas le même poids. « D'où notre volonté de mettre au point un outil capable de refléter ces différents points de vue, donnant par là même plusieurs éclairages aux décideurs politiques », explique Guillaume Karr, ingénieur-chef de projet dans l'Unité « Impact Sanitaire et expositions » de l'INERIS. Voilà pourquoi il ne dresse pas un seul et unique classement... mais offre plusieurs possibilités. »

Explications. Dans une première liste, le critère prioritaire pour classer une substance est le « risque collectif », autrement dit le nombre annuel de « cas » (pathologies et décès) que lui attribuent les experts scientifiques. Deux autres listes ont été construites en tenant compte de critères plus sociétaux par des acteurs



de la société civile accompagnés par l'INERIS. Dans la deuxième, les substances sont prioritairement classées en fonction du nombre total de personnes qui y sont exposées. Ainsi, une substance cancérigène comme le perchloroéthylène utilisée pour le nettoyage à sec dans les pressings se retrouve loin derrière certains polluants atmosphériques qui touchent énormément de monde. Enfin, dans la troisième, la priorité est donnée aux personnes « sensibles » aux effets de la substance : femmes enceintes, enfants, asthmatiques...

Très concrètement, l'INERIS a testé son outil sur 319 substances toxiques. « Aux cent premiers rangs des trois listes, on retrouve logiquement des représentants des grandes familles de polluants : hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), pesticides, métaux lourds, solvants chlorés, dioxines, PCB... », indique Guillaume Karr. Mais, pour certaines substances, le classement fait le grand écart d'une liste à l'autre, justifiant l'intérêt de la démarche retenue. C'est par exemple le cas du célèbre bisphénol A, ce perturbateur endocrinien désormais interdit pour les biberons en France qui apparaît au 152<sup>e</sup> rang sur la liste « risque collec-

tif » (car on ne sait pas aujourd'hui exprimer son impact en termes de nombre de cas attribuables), mais 21<sup>e</sup> sur la liste « populations sensibles » (comme les bébés). Autre exemple intéressant : le Musc Xylène, une fragrance utilisée dans des produits de consommation courante, persistante et bioaccumulable : 30<sup>e</sup> dans la liste « population totale exposée », mais 113<sup>e</sup> sur la liste « populations fragiles ».

L'exercice a aussi montré des limites riches d'enseignements. En effet les données disponibles étaient souvent insuffisantes, y compris pour certaines substances du top 20 de la liste « risque collectif ». Globalement, sur les 319 substances passées au crible, la qualité des données a été jugée « moyenne ». « Avant de pouvoir définitivement statuer sur certaines substances classées « peu prioritaires », il faudra donc d'abord approfondir leur étude », estime Guillaume Karr. Un problème auquel devrait contribuer à remédier le règlement européen REACH, qui impose aux industriels de fournir les données nécessaires pour toute substance fabriquée ou importée à plus d'une tonne par an dans l'espace économique européen ●



## « Notre outil donne plusieurs éclairages aux décideurs politiques. »

Guillaume Karr, ingénieur-chef de projet dans l'Unité « Impact sanitaire et expositions » de l'INERIS.



Opération de sensibilisation de France Nature Environnement à la pollution atmosphérique (rendezmoimonair.org).

## « Les politiques ne peuvent plus fuir leurs responsabilités »

### QUESTIONS À MARYSE ARDITI\*

Quelle est l'ampleur de la pollution liée aux substances toxiques ?

M. A. Voici quelques chiffres qui parlent d'eux-mêmes. Aujourd'hui, 90 % des citoyens de l'Union européenne sont quotidiennement exposés à des polluants de l'air dangereux pour la santé. En France, 96 % des cours d'eau français et 61 % des eaux souterraines sont pollués par les pesticides. Plus globalement, 50 % des rivières, lacs et nappes d'eau souterraines n'atteindront pas un bon état écologique souhaité pour 2015.

Selon vous, quel est le principal atout de cet outil développé par l'INERIS ?

M. A. La grande force de cet outil, c'est le recours à cette analyse multicritères dont nous sommes très partisans à France Nature Environnement. Car, à ma connaissance, c'est la seule méthode qui permette de faire travailler ensemble et sur un pied d'égalité des experts et des « profanes », autrement dit des personnes qui ne sont pas scientifiques de métier (grand public, élus, associations...).



Présente-t-il d'autres avantages majeurs ?

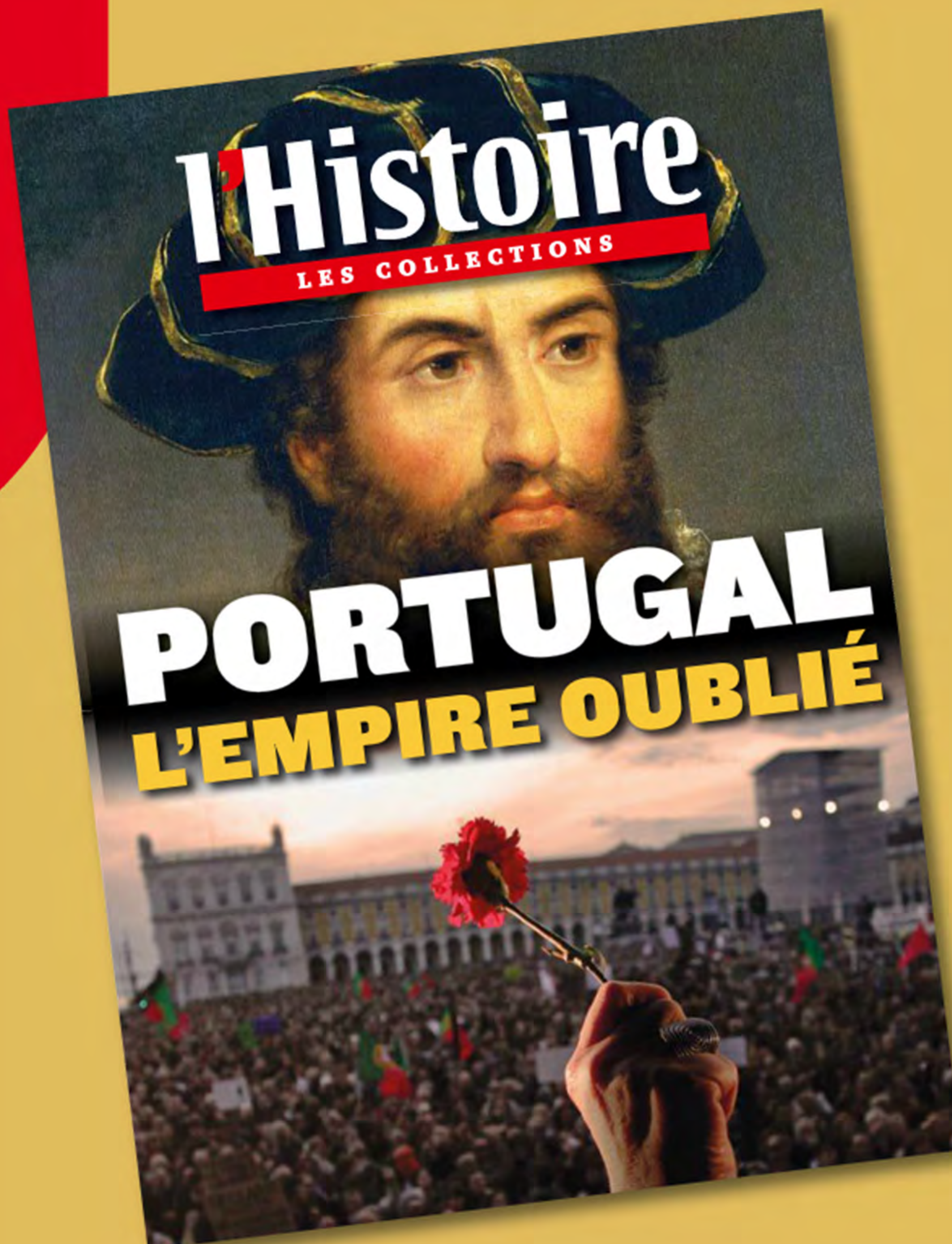
M. A. L'autre grand intérêt, c'est qu'avec cette méthode, les décideurs politiques ne peuvent plus fuir leurs responsabilités en s'en remettant aux conclusions de rapports d'experts, sous prétexte que le sujet est trop technique. Ils sont obligés d'annoncer publiquement les critères de classement prioritaires à leurs yeux. Bref, le politique retrouve son rôle de décideur. Enfin, cette méthode évite de tout ramener à des euros, de tout « monétariser ».

Quel a été le rôle de FNE dans ce projet ?

M. A. Dès le début du projet, j'ai été associée en tant que membre de la Commission d'Orientation de la Recherche et de l'Expertise (CORE) de l'INERIS. J'ai donc tout de suite fait valoir ma préférence pour le recours à l'analyse multicritères. Puis, à chaque réunion de la CORE, nous avons débattu tous ensemble des critères proposés par l'INERIS. Et si besoin, nous les peaufinons afin qu'ils prennent en compte les attentes de tous les acteurs. Ce fut une source de discussions passionnantes !

\*Pilote du réseau « Risques et impacts industriels » à France Nature Environnement (FNE).





- De l'Inde au Brésil :  
le premier empire moderne
- Lisbonne, reine de l'Océan
- 25 avril 1974 : des œillets  
font la démocratie

**en kiosque**



• **Les livres** p. 85

La sélection de la rédaction de *La Recherche*

• **L'agenda** p. 96

Les conférences, les expositions

• **Curiosités** p. 98

Les insolites de l'actualité scientifique



## 76 **L'entretien du mois**

avec Jean-Pierre Bourguignon

« *Aller vers une fondation européenne pour la recherche ?* »

Propos recueillis  
par Marie-Laure Théodule

## 80 **Déchiffrage**

*Plus de 110 garçons pour 100 filles*

par Géraldine Duthé

## 81 **Le grand débat**

*La musique a-t-elle un pouvoir thérapeutique ?*

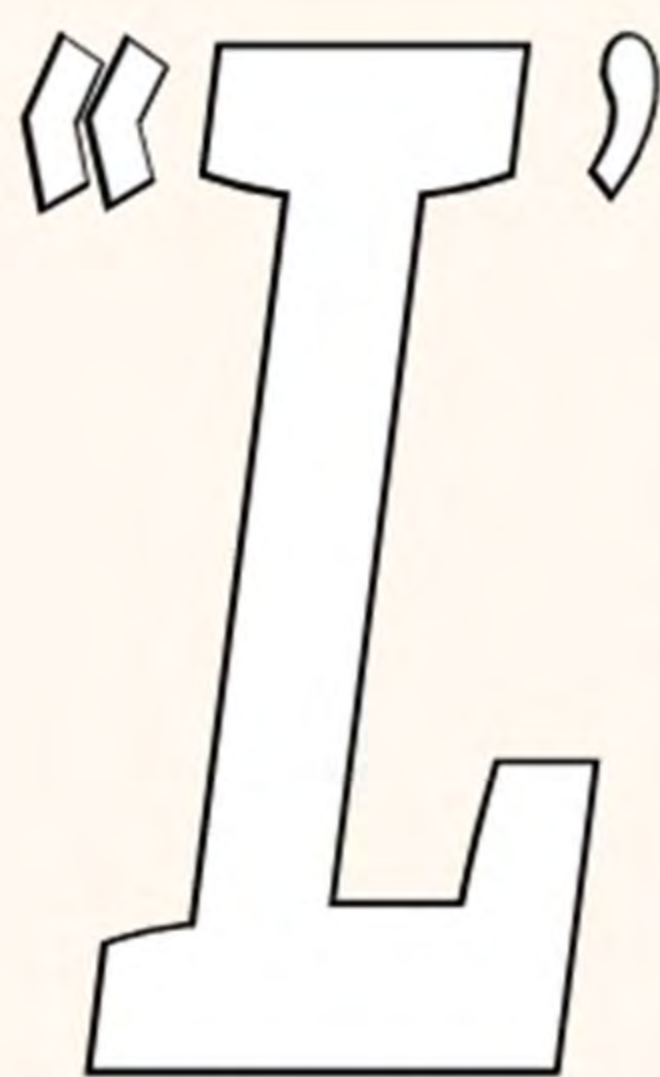
avec Marisol Touraine  
et Hervé Platel

## 92 **Histoire de science**

*Le voyage des blocs erratiques*

par Marie-Christine de La Souchère

## L'Europe, terre de science



Europe est encore une terre de science », affirmait Helga Nowotny dans *La Recherche* en 2012. À l'époque, la présidente du Conseil européen de la recherche, agence européenne de financement dont on fêtait les 5 ans, combattait l'image déplorable du Vieux Continent aux yeux du reste de la planète. Et soulignait le succès de son organisation dans le soutien à la recherche d'excellence. Le mathématicien français Jean-Pierre Bourguignon, qui vient de lui succéder, se réclame de la même ligne. Mais les contours de sa fonction ont un peu évolué. Il lui faut, plus encore, défendre au sein

même de la machine bruxelloise les deux pièces maîtresses de l'édifice : l'indépendance et la démarche scientifique. Il promet d'y veiller, et de tout faire pour les renforcer.

**Hélène Le Meur**





En sept ans d'existence, le Conseil européen de la recherche a assis sa notoriété grâce aux bourses attribuées aux chercheurs de haut niveau. Son nouveau président, le mathématicien français **Jean-Pierre Bourguignon**, entend porter plus loin le soutien à la recherche européenne.

# « Aller vers une fondation européenne pour la recherche ? »

**Jean-Pierre Bourguignon** est le nouveau président du Conseil européen de la recherche (« European Research Council » ou ERC), depuis le 1<sup>er</sup> janvier 2014. Directeur de recherche au CNRS, où il a fait toute sa carrière, il a dirigé auparavant l'Institut des hautes études scientifiques de 1994 à 2013. Ingénieur de l'École polytechnique et docteur ès sciences mathématiques, ce spécialiste de géométrie différentielle a également été professeur à l'École polytechnique de 1986 à 2012.

**LA RECHERCHE :** Vous venez d'être nommé à la présidence du Conseil européen de la recherche (ERC), une organisation de soutien à la recherche fondamentale qui a acquis une place à part depuis sa création en 2007 par la Commission européenne. Qu'est-ce qui en fait la spécificité ?

**JEAN-PIERRE BOURGUIGNON :** En sept ans d'existence, le Conseil européen de la recherche, l'ERC, a acquis une grande notoriété parce que c'est l'une des seules organisations en Europe, et sans doute au monde, à financer des chercheurs avec des soutiens conséquents pour qu'ils puissent monter une équipe sur une durée longue – cinq ans – tout en leur laissant une grande indépendance. Et cela pour faire de la recherche fondamentale exploratoire, c'est-à-dire porteuse d'innovation, dans tous les domaines scientifiques, et avec un seul critère pour les sélectionner : la qualité de leur projet. Depuis 2007, l'ERC a ainsi financé plus de 4 000 chercheurs pour un montant total de 7,5 milliards d'euros. Aujourd'hui, obtenir une bourse de l'ERC est devenu une sorte de label, dont les universités et les organismes de recherche européens se servent pour vanter le mérite de leurs équipes. Or cette réussite tient beaucoup à la façon dont l'ERC fonctionne.

**En quoi cette organisation est-elle exemplaire ?**

**J.-P.B.** L'ERC fonctionne suivant des règles qui lui permettent de rester indépendant à la fois vis-à-vis de la Commission européenne, mais aussi de lobbies qui pourraient être tentés de peser sur l'attribution des moyens. Cela tient à une organisation à la fois simple et efficace :

elle s'appuie d'une part sur un conseil scientifique, composé de 22 membres nommés par la Commission, qui définit notamment les appels à projets, et d'autre part sur une agence exécutive forte aujourd'hui de près de 400 personnes, et qui gère avec une grande efficacité actuellement plus de 4 000 contrats correspondant à un budget annuel de 1,7 milliard d'euros. Le conseil scientifique de l'ERC a découpé les champs du savoir en 25 sous-champs, presque tous pluridisciplinaires, et des comités de sélection ont été mis en place pour chacun des trois niveaux retenus pour l'attribution des contrats (de deux à sept ans après la thèse, de sept à douze ans après la thèse, et enfin les seniors), soit en tout 75 comités en charge de choisir les chercheurs qui vont recevoir le soutien de l'ERC. Pour cela, il incombe au conseil scientifique d'identifier tous les ans de 400 à 500 nouveaux experts pour participer à ces comités. Le principe est de renouveler la composition des comités tous les quatre ans afin d'éviter toutes sortes de conflits d'intérêts et d'« user » les évaluateurs, mais aussi pour « coller » à l'évolution de la science.

**Votre mission à la tête de l'ERC est-elle semblable à celle de votre prédécesseur, Helga Nowotny ?**

**J.-P.B.** Oui, car on ne chamboule pas une jeune institution qui réussit aussi remarquablement. Dans la mesure où le budget de 13,1 milliards d'euros attribué à l'ERC pour la période 2014-2020 lui permet de se développer à partir du niveau atteint en 2013, il n'y a pas lieu de remettre en question l'organisation qui a fait son succès. >>>



數學好玩

陳省身  
二〇一七年七月

The Unravelers  
Mathematical Snapshots



## « Aller vers une fondation européenne pour la recherche ? »



» Je vais cependant opérer dans un cadre institutionnel un peu différent : Helga Nowotny, dont la base est à Vienne, présidait le conseil scientifique, mais il y avait aussi un secrétaire général qui faisait le lien, sur place à Bruxelles, entre le conseil et l'agence exécutive. La nouveauté, c'est que, en plus de présider le conseil scientifique, j'occupe en quelque sorte aussi la fonction de secrétaire général et, pour cela, le titre utilisé est celui de « conseiller spécial » de la Commission européenne. Je réside donc à Bruxelles. Certains considèrent que ce changement porte le risque d'une diminution de l'indépendance du président.

**L'attribution des contrats fait apparaître certains déséquilibres géographiques. À quoi tient cette situation ?**

**J.-P.B.** Il y a plusieurs cas de figure. Prenons celui de la Grande-Bretagne, qui arrive en tête : pour les principaux appels de la seule année 2013, elle a reçu presque 190 bourses, contre 130 pour l'Allemagne et 106 pour la France. Si elle domine ainsi, c'est parce que les institutions britanniques savent mieux attirer des chercheurs étrangers d'excellent niveau en s'appuyant notamment sur des services qui aident ces derniers à monter leurs dossiers, voire les montent à leur place. En France, le CNRS a compris l'importance pour les chercheurs d'avoir des dossiers bien présentés. D'ailleurs en ce qui concerne le nombre de contrats ERC cumulés depuis le début de son existence, c'est le CNRS qui arrive en tête avec 210 contrats obtenus contre 138 pour l'université d'Oxford, qui se situe en deuxième position. Pour lever toute ambiguïté, il faut rappeler que le CNRS a un réseau qui couvre toute la France.

**Existe-t-il d'autres types de disparités géographiques ?**

**J.-P.B.** Oui, et le déséquilibre le plus criant est celui qui distingue les treize pays qui ont rejoint l'Union européenne le plus récemment. Ces treize pays ne reçoivent ensemble que 3 % du financement de l'ERC, et il y a même un pays qui ne reçoit rien. On constate plus généralement que les pays qui investissent beaucoup en recherche et développement reçoivent presque en proportion directe de leurs investissements. Seule une action à long terme s'appuyant sur des investissements, tant dans les infrastructures de recherche que dans la

formation avancée, peut faire évoluer la situation positivement. Parmi les mesures simples pour amorcer ce processus, du point de vue de l'ERC, on peut mentionner l'attribution de financements nationaux aux chercheurs qui ont passé la première sélection de l'ERC (autour de 20 % des candidats) et qui n'ont finalement pas été sélectionnés à l'étape suivante, afin qu'ils développent leur recherche jugée très prometteuse. Cela pourra les aider à encore mieux se placer dans une nouvelle course pour un contrat ERC.

**Un autre déséquilibre criant, qui ne fait, là aussi, que refléter la situation observée dans la science en général, est celui qui existe entre hommes et femmes. Cherchez-vous à y remédier ?**

**J.-P.B.** Comme toutes les autres institutions scientifiques, l'ERC est confronté à ce déséquilibre. Nous travaillons à le réduire, tant pour les candidatures à une bourse ERC que dans la composition des comités d'évaluation. C'est à la fois un enjeu important et un problème complexe. Prenons un exemple : la Commission voudrait que dans toutes les instances d'évaluation mises en place dans son périmètre, comme les comités de sélection de l'ERC, il y ait au moins 40 % de femmes. Or certains secteurs de la science emploient moins de 20 % de femmes. Dans ces conditions, beaucoup de femmes scientifiques issues de ces secteurs, parmi les meilleures, sont très souvent sollicitées pour siéger dans de tels comités. Elles ont tendance à refuser plus souvent cette tâche que les hommes, préférant consacrer leur temps à la recherche. Cela dit, il y a là aussi de grandes disparités géographiques : les pays nordiques ont réduit ce déséquilibre par exemple ; d'autres pays comme l'Allemagne beaucoup moins.

**Le conseil scientifique a décidé d'attribuer deux tiers des bourses aux plus jeunes et un tiers aux seniors. Allez-vous poursuivre cette orientation ?**

**J.-P.B.** Je suis complètement en phase avec ce choix, et ce d'autant que, dans beaucoup de pays, la situation offerte aux jeunes chercheurs s'est beaucoup détériorée dans les dernières années. Ils sont forcés d'enchaîner des contrats à durée déterminée. Les soutiens de l'ERC permettent quelquefois de « sauver les meubles ». Il ne faudrait cependant pas que certains pays profitent de l'existence des financements ERC pour s'affranchir de l'obligation de disposer de postes stables en nombre suffisant pour développer la recherche fondamentale à un bon niveau.

**Concrètement, que pouvez-vous faire pour améliorer la condition des jeunes chercheurs ?**

**J.-P.B.** À partir du moment où le conseil scientifique a décidé de financer des candidats jeunes,



je pense qu'il est de notre responsabilité de nous assurer que ces jeunes ne vont pas aller « droit dans le mur » à la fin des cinq ans que dure le contrat de l'ERC. En tant que président de l'ERC, je vais donc essayer de convaincre les responsables européens de la recherche que nous avons la responsabilité collective de disposer de suffisamment d'emplois stables dans la recherche pour que la nouvelle génération de chercheurs puisse se développer dans des conditions attractives. Évidemment je n'ai aucun pouvoir pour les obliger à le faire. Cependant j'ai pu constater dans mes premières rencontres que certains d'entre eux sont parfaitement conscients du problème. Ce serait bien qu'une vue globale de cette question émerge au niveau européen car, dans certains pays comme la Chine, le Brésil, la Corée du Sud ou Singapour, ce problème ne se pose pas du tout : il y a pléthore de postes.

#### **Allez-vous mener d'autres combats ?**

**J.-P.B.** À court terme, j'ai deux objectifs. Le premier est d'assurer que la couverture de l'ensemble du champ de la science par les comités de sélection est adéquate, et notamment qu'elle suit bien l'évolution de la recherche. Actuellement les 25 comités de sélection en place sont presque tous, par la force des choses, transdisciplinaires. Et, pour des raisons logistiques, il n'est pas facile d'en ajouter un : je voudrais être sûr par exemple qu'un sujet émergent comme celui des données massives (Big Data) est correctement couvert. Cela pose forcément la question de l'équilibre entre champs scientifiques. Pour le moment il y a une grille de répartition des moyens entre trois grands domaines : « sciences physiques et ingénierie », qui couvre aussi les mathématiques, l'informatique et la chimie ; « sciences de la vie » et « humanités et sciences sociales ». Mon second objectif est de faire mûrir un débat sur cette répartition, avec peut-être en vue une revalorisation de la place des « humanités et sciences sociales ».

#### **Et à plus long terme, comment envisagez-vous l'avenir de l'ERC ?**

**J.-P.B.** Dans ma position, je considère comme une obligation incontournable de préparer l'avenir, notamment de réfléchir à ce que pourrait devenir l'ERC après 2020, voire à encore plus long terme. Parmi les rêves évoqués lors d'une réunion de remue-méninges faite par le conseil scientifique, il y a celui que l'ERC devienne une fondation d'intérêt public à l'échelle européenne

avec un budget lui permettant maintenir son niveau actuel, voire de l'intensifier. Comme il s'agit d'utiliser année après année les revenus de ce fonds, cela veut dire qu'il doit se monter à au moins 50 milliards d'euros. Après tout, les grandes institutions américaines comme Harvard ou Stanford ont des fonds propres qui se comptent en dizaines de milliards de dollars.

#### **Vous êtes mathématicien, et vous avez une expérience de dix-neuf ans à la direction d'une institution de recherche internationale prestigieuse en France, l'Institut des hautes études scientifiques. Cela constitue-t-il des atouts pour votre nouvelle mission ?**

**J.-P.B.** À plusieurs titres, je pense que oui. Tout d'abord, j'ai une ouverture sur une large palette de disciplines. À l'Institut des hautes études scientifiques (IHES), je me suis frotté depuis longtemps à la physique théorique et j'ai fait une ouverture vers la biologie. Et en tant que mathématicien, je crois être assez bien placé pour comprendre les chercheurs en sciences humaines et sociales. Ensuite, en tant que directeur de l'IHES, j'ai noué un réseau de contacts à

l'international au sein de plusieurs grandes institutions de recherche, ce qui va m'être très utile afin d'établir des collaborations pour l'ERC. Enfin, j'ai noué des contacts avec un nombre significatif de responsables de la recherche et de la stratégie de grandes entreprises. J'ai pu constater qu'un nombre très important d'entre eux étaient vraiment intéressés par la science dans ses aspects fondamentaux. Je voudrais travailler à créer au niveau européen un club d'entreprises qui soient des supporters de l'ERC.

#### **À terme, votre objectif serait-il donc que les entreprises jouent un plus grand rôle vis-à-vis de l'ERC ?**

**J.-P.B.** Je pense qu'il serait erroné de limiter l'intérêt des entreprises les plus ambitieuses au développement de leur prochain produit. L'objectif serait qu'elles fassent la promotion de l'ERC et pas du tout qu'elles aient un quelconque droit de regard sur les choix et l'activité scientifique de l'ERC. Certains dirigeants de grandes entreprises apprécient de financer la recherche de haut niveau sans exiger de contrôle. Ils savent que c'est important qu'elle se développe au plus haut niveau. Ils savent aussi que c'est de ces résultats imprévus qu'ils vont tirer le fondement de leur activité de demain.

■ **Propos recueillis par Marie-Laure Théodule**

*Je ferai mûrir le débat sur la répartition des moyens entre les sciences physiques, de la vie et sociales*

#### **Pour en savoir plus**

➤ <http://erc.europa.eu> Le site du Conseil européen de la recherche.

➤ Hélène Le Meur : « Helga Novotny : "L'Europe est plus que jamais une terre de recherche" », *La Recherche*, novembre 2012, p. 88.



# Plus de 110 garçons pour 100 filles

*Dans sept pays d'Europe orientale, le nombre de naissances masculines est anormalement élevé. Un phénomène longtemps ignoré qui s'explique par une sélection prénatale, comme en Inde et en Chine.*

Par **Géraldine Duthé**, chargée de recherche à l'Institut national d'études démographiques.

On assiste à une masculinisation des naissances quand le rapport entre le nombre de garçons et de filles qui naissent au sein d'une population (le sex-ratio à la naissance) est supérieur à la norme généralement observée : 105 garçons pour 100 filles. Le phénomène touche les deux pays les plus peuplés du monde : la Chine, où le sex-ratio est proche de 118, et l'Inde, où il est légèrement supérieur à 110. Mais deux régions d'Europe orientale – le Caucase du Sud et les Balkans – sont aussi concernées. Dans le Caucase du Sud, ce ratio atteint près de 112 en Géorgie, 115 en Arménie et 117 en Azerbaïdjan. Dans les Balkans, quoique plus faible, il est aussi anormalement élevé, autour de 110, en Albanie, au Kosovo, au Monténégro et en Macédoine occidentale. Le phénomène, apparu au début des années 1990, est resté relativement caché – on l'imputait à un sous-enregistrement des naissances à l'état civil – jusqu'à ce que des études récentes en confirment l'existence.

La masculinisation des naissances en Europe orientale tient à la combinaison de facteurs de nature différente. Tout d'abord, les méthodes modernes de sélection prénatale se sont banalisées dans ces pays à partir des années 1990 avec l'ouverture des frontières. Le passage à l'économie de marché a en effet permis l'importation de matériels de qualité permettant de déterminer au plus tôt le sexe du fœtus lors des échographies et l'accès à l'interruption volontaire de grossesse s'est généralisé. Ensuite, tous ces pays ont connu une baisse progressive de la fécondité, aujourd'hui inférieure à deux enfants par femme, ou très proche de ce

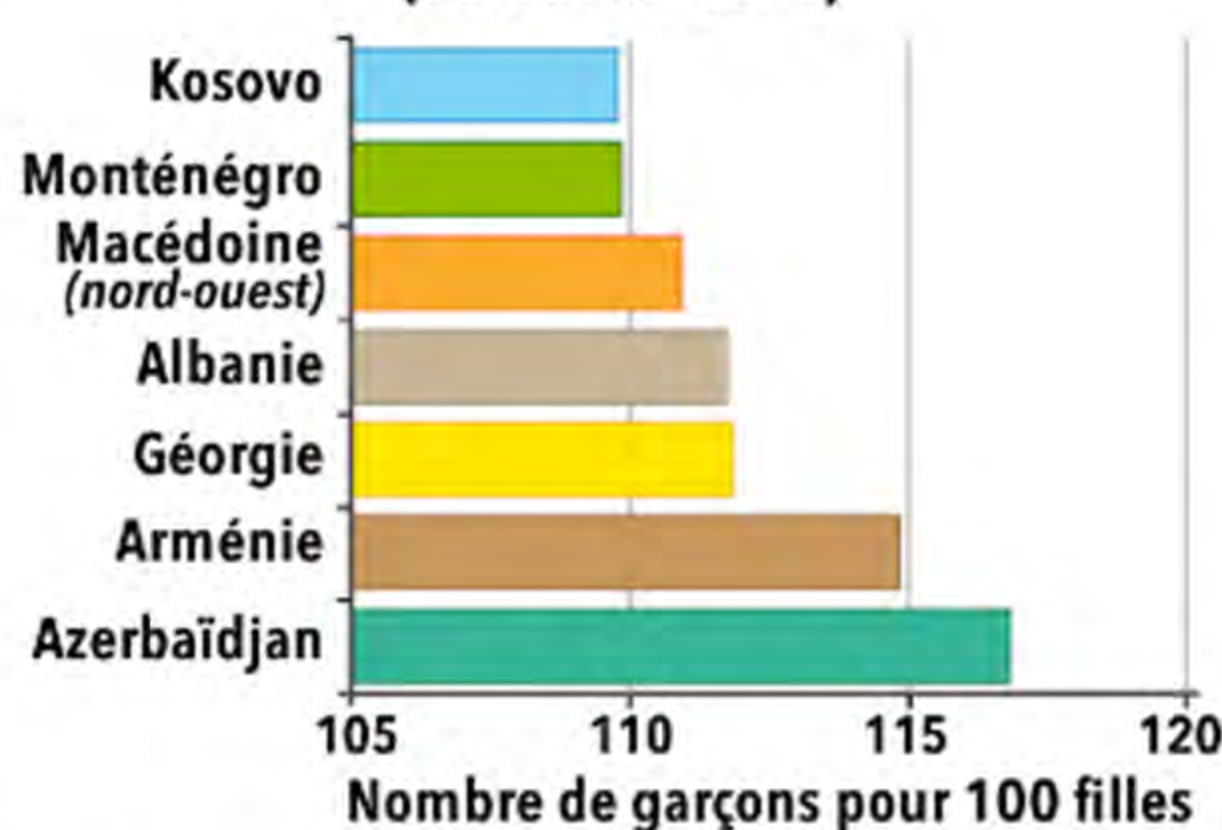
niveau dans le cas du Kosovo. Dans ce contexte, les couples qui souhaitent avoir au moins un garçon peuvent être amenés à interrompre une grossesse s'il apparaît que le fœtus est féminin. Enfin, la préférence pour les garçons caractérise la culture de ces pays. Certes les régimes communistes avaient aboli un grand nombre de discriminations de genre au sein de la société, en matière d'emploi et d'éducation notamment. Mais les inégalités entre garçon et fille perduraient au sein de la famille demeurée patriarcale. Et la chute du communisme a ravivé la tradition : les États n'assurant plus leur rôle égalitaire en

matière de solidarité et d'emploi, la préférence pour les garçons, considérés comme de futurs soutiens de famille, est revenue en force.

De tels déséquilibres auront en fait peu d'impact sur la démographie européenne de demain. Car la population totale des sept pays concernés par la masculinisation ne représente que 23 millions d'habitants. Toutefois, la détermination du sexe par l'examen du sang fœtal ou le diagnostic préimplantatoire vont sans doute se banaliser au fur et à mesure des progrès technologiques, ce qui facilitera encore plus la sélection et les inégalités de genre. Pourtant, les gou-

vernements et les sociétés civiles de ces pays se sont peu mobilisés autour de cette question. La récente prise de conscience du phénomène au niveau international, marquée par la publication d'un rapport du Conseil de l'Europe, n'a pas encore débouché sur des mesures concrètes : il n'y a eu jusqu'à présent dans ces pays aucune campagne contre les avortements sélectifs, ni aucune mesure pour promouvoir l'égalité entre les sexes dans la famille et dans la société. ■

**RAPPORT DE MASCULINITÉ À LA NAISSANCE**  
(autour de 2010)



**LE SEX-RATIO** à la naissance est déséquilibré dans sept pays situés en Europe orientale. L'Azerbaïdjan remporte la palme de la masculinisation avec un taux de 117 garçons pour 100 filles, proche de celui observé en Chine, 118.



La musicothérapie est aujourd'hui de plus en plus utilisée dans la prise en charge de nombreuses pathologies, et les études prouvant son efficacité se multiplient. Mais les pouvoirs publics restent prudents.

# La musique a-t-elle un pouvoir thérapeutique ?

« **M**usique, sciences et santé, accord majeur ». Tel était l'intitulé officiel d'un récent colloque organisé par la Société des auteurs, compositeurs et éditeurs de musique (Sacem). On s'y est notamment penché sur la question de l'efficacité de la « musicothérapie », autrement dit le recours à la musique pour soigner. Elle est en effet de plus en plus utilisée dans les hôpitaux, que ce soit dans les maternités, en pédiatrie, cancérologie, soins palliatifs, neurologie, psychiatrie... À tel point que la Haute Autorité de santé la recommande noir sur blanc dans la prise en charge de diverses pathologies : maladie d'Alzheimer, anorexie mentale, pour les adultes en soins palliatifs...

Mais de là à rembourser les séances prodiguées par les musicothérapeutes, il y a un pas que les autorités sanitaires ne sont pas prêtes à franchir. Surtout, elles estiment que le pouvoir thérapeutique de la musique reste à démontrer, et que la musicothérapie relève davantage du domaine culturel. C'est ce que suggère la ministre de la Santé, Marisol Touraine. Pourtant, selon Hervé Platel, chercheur en neuropsychologie, les preuves de son efficacité s'accumulent, notamment grâce aux progrès de la neuro-imagerie. Des améliorations dans le cas de la maladie d'Alzheimer, de Parkinson ou chez des victimes d'un accident vasculaire cérébral sont obtenues... Marisol Touraine, présente au colloque, en juge d'ailleurs certaines « particulièrement intéressantes » : un début de reconnaissance ? ■ Jean-Philippe Braly

**Marisol Touraine** est ministre des Affaires sociales et de la Santé. Elle a récemment participé à un colloque sur les liens entre musique, sciences et santé organisé par la Sacem. Nous publions ici une retranscription adaptée de son allocution.



**Hervé Platel** est professeur de neuropsychologie, membre du laboratoire Inserm « neuropsychologie et neuro-anatomie fonctionnelle de la mémoire humaine » à l'université de Caen, et musicien. Il a copublié *Neuropsychologie et art*, aux éditions Boeck Solal.

### La musicothérapie en chiffres

**45**

La musicothérapie professionnelle est apparue en France il y a déjà quarante-cinq ans, avec la création du centre de musicothérapie en 1969. La première formation associative date de 1972.

**5 000**

La Confédération européenne de musicothérapie compte aujourd'hui plus de 5 000 musicothérapeutes. En France, plus d'un millier aurait obtenu un diplôme universitaire depuis la création de ce type de cursus dans les années 1980.

**3**

Trois universités françaises dispensent aujourd'hui un diplôme de musicothérapeute : Nantes, Paris-Descartes et Montpellier.

**2**

Il existe aujourd'hui deux principales structures nationales : l'Association française de musicothérapie regroupe des cliniciens, des musiciens et des chercheurs et la Fédération française de musicothérapie englobe les formations universitaires et plusieurs centres privés de formation.



## « On ne mesure pas de façon rigoureuse l'ap »



**Marisol  
Touraine**

**P**our beaucoup de nos concitoyens, la relation entre musique et santé n'est sans doute pas évidente car elle relève de deux démarches très différentes. En effet, la santé est associée à l'idée de science, de progrès de la recherche médicale et à une démarche rigoureuse ; à l'inverse, la musique relève d'une démarche moins facile à appréhender liée à la sensibilité et à l'émotion. On élève des doutes

sur son utilité car on la regarde ordinairement comme un objet de simple « agrément », comme le disait déjà Aristote. Et pourtant, ce sont des idées qui aujourd'hui ne résistent plus. D'abord parce que si l'on s'en réfère à la définition qu'en donne l'Organisation mondiale de la santé, la santé n'est pas autre chose qu'un état général de bien-être.

À partir de là, il faut donc se demander de la manière la plus rationnelle possible comment faire contribuer la musique à cette situation de bien-être physique, mental et social de la population.

Mais pour être honnête, je ne suis pas certaine que nous soyons aujourd'hui en mesure d'apprécier de façon rigoureuse et scientifique ce que la musique apporte, par exemple en termes d'économie pour la Sécurité sociale. Or, évidemment, c'est aussi une préoccupation du ministère de la Santé.

Certes, il y a aujourd'hui des travaux sur la maladie d'Alzheimer qui montrent que les effets de la musique contribuent incontestablement à ce bien-être. Et depuis vingt ans environ, la recherche universitaire en neurosciences étudie de façon plus fine l'influence

que peuvent avoir des mélodies, des sons, des accords sur notre cerveau et sur notre santé.

**État de plénitude.** Il y a surtout deux séries de travaux qui me paraissent particulièrement intéressantes. Les premiers ce sont d'abord ceux d'Hervé Platel, qui a montré que la musique et le chant peuvent contribuer à préserver les capacités d'apprentissage des patients atteints de la maladie d'Alzheimer. Pour ma part, j'ai rencontré à de nombreuses reprises des patients atteints de la maladie d'Alzheimer à des stades divers, et des

## « Les preuves scientifiques des effets de la »



**Hervé  
Platel**

**D**epuis l'avènement des techniques de neuro-imagerie dans les années 1990, de très nombreuses études ont prouvé que la musique modifie le cerveau. Et les preuves scientifiques de son pouvoir thérapeutique commencent à s'accumuler. Nous avons par exemple recensé une dizaine d'études très sérieuses sur l'impact des ateliers musicaux dans la maladie d'Alzheimer ; il en ressort

clairement qu'ils réduisent l'anxiété, la dépression et les comportements agressifs des patients, et améliorent leur humeur, leur communication et leur autonomie. Certaines études épidémiologiques suggèrent aussi que la pratique musicale chez les sujets âgés serait un facteur limitant le risque de développer une démence.

**Ateliers d'apprentissage.** Récemment, nous avons fait une découverte surprenante, dans le cadre d'une étude menée au sein d'une institution de Caen accueillant des patients Alzheimer à

un stade avancé. Contre toute attente, ces patients – incapables de mémoriser ne serait-ce que de courts textes ou poèmes – sont facilement parvenus

plupart croyaient les avoir appris dans l'enfance ! La musique a ainsi révélé que la mémoire à long terme de ces malades continue à fonctionner, ce que l'on

*On observe différents effets bénéfiques de la musique sur l'anxiété et la mémoire, mais on ignore encore leur origine*

à mémoriser à long terme de nombreuses mélodies qu'ils ne connaissaient pas auparavant. On leur avait fait apprendre ces dernières dans le cadre d'un atelier d'apprentissage de nouvelles chansons, mais la

pensait impossible. Ce résultat suggère aussi que la musique pourrait stimuler cette mémoire inconsciente ou implicite.

Mais les études sur le pouvoir thérapeutique de la musique ne concernent



## port de la musique à la santé publique »

associations qui les font participer à des chorales. Et ce qui m'a toujours frappé, c'est de voir l'état de plénitude, de bien-être dans lequel se trouvaient

européen de recherches sur les effets thérapeutiques de la musique, et dont les premiers résultats obtenus mettent en lumière l'influence posi-

que des perspectives existent, la valeur thérapeutique de la musique n'est pas encore prouvée sur des bases méthodologiques de santé publique. On voit bien qu'il y a quelque chose, mais nous avons besoin d'aller plus loin dans l'exploration des travaux qui sont mis en place, et qui se développent avec le monde associatif. Plus largement, plusieurs agences régionales de la santé ont noué des partenariats avec le ministère de la Culture qui ont permis de tisser des liens entre acteurs du soin et ceux de la musique. Ainsi, la musique est

désormais pleinement présente dans les hôpitaux. Et ce mouvement rencontre une réelle ambition de l'accès de tous à la culture dans toutes les circonstances, mais qui n'est bien sûr pas celle du ministère de la Santé. Depuis 1999, il y a une politique commune d'accès à la culture en milieu hospitalier entre le ministère de la Santé et celui de la Culture, une convention a été signée et ce mouvement doit être maintenu, voire amplifié. Pour autant, il reste beaucoup de travail à accomplir tant dans le domaine de la recherche que dans la pratique sur le terrain. ■

### *Des liens entre les acteurs du soin et ceux de la musique se tissent, mais ils relèvent plus de la culture que de la santé publique*

les malades dans ces moments-là. La seconde série de travaux, ce sont les études conduites au CNRS par Emmanuel Bigand, de l'université de Bourgogne, qui coordonne en ce moment un programme

tive de la musique dans la prise en charge de maladies invalidantes.

Mais la prudence reste de mise car si ces travaux en science fondamentale sont de mieux en mieux reconnus et montrent

## musique sur la santé s'accumulent »

pas que la maladie d'Alzheimer. Des travaux ont montré l'efficacité de la musique pour réduire les troubles moteurs des parkinsoniens ou de victimes d'un accident vasculaire cérébral, ainsi que les troubles du langage liés à ce type d'accident. Des études montrent également les bienfaits de la musique pour améliorer la communication et la socialisation des enfants autistes, sur la dyslexie et de nombreux troubles du langage, pour calmer la douleur et relaxer, pour faire réagir des patients dans le coma.

Toutefois, il reste encore beaucoup à faire dans ce

domaine. Nous ne savons pas par exemple ce qui est à l'origine de ces différents effets bénéfiques de la musique : les aspects rythmiques, la récurrence des schémas mélodiques, etc. ? Ces effets sont-ils spécifiques à l'activité musicale ? La musique peut-elle nous aider à mieux vieillir ? Sur ce dernier point, nous allons bientôt commencer une nouvelle étude sur des personnes âgées qui participent à des ateliers d'apprentissage de guitare, sans jamais avoir fait de musique auparavant. Objectif : voir si cela modifie leur cerveau, et surtout si cela ralentit le déclin

de leurs capacités cognitives lié à l'âge (mémoire, attention, etc.). Nous allons également poursuivre nos recherches sur la maladie d'Alzheimer par neuro-imagerie, pour déterminer les ressources cérébrales mises en œuvre par ces patients capables de mémoriser de nouvelles mélodies de manière implicite. Avec en ligne de mire, l'idée de voir si la musique pourrait être mise à contribution pour freiner la progression de la maladie.

Enfin, dans chaque institution accueillant des patients Alzheimer, il serait nécessaire de débloquer des moyens financiers pour

mener de vrais projets de recherche collaboratifs sur l'impact de la musique ; l'idée serait de transformer ce qui ressemble encore trop à des animations musicales, en véritables « laboratoires de vie » fondés sur une approche méthodologique plus rigoureuse qui n'ignore plus le cerveau. Aujourd'hui, les musicothérapeutes n'ont pas de statut officiel (même ceux ayant décroché un diplôme universitaire), les ateliers musicaux ne sont pas pris en charge par la Sécurité sociale et sont encore très souvent assurés par des bénévoles par manque de budgets. ■



# Le Magazine Littéraire

MAI 2014

www.magazine-litteraire.com

N°543

## INÉDIT

« LE SENS DE MA VIE »  
LA DERNIÈRE  
AUTOBIOGRAPHIE DE  
ROMAIN GARY



## ENQUÊTE

LES FAUSSES VALEURS  
DE LA PENSÉE  
ANTI-SYSTÈME

## LE MAGAZINE DES ÉCRIVAINS



GRAND  
ENTRETIEN  
AVEC  
TOM  
WOLFE

## CARNET DE VOYAGE

MARSEILLE,  
PAR REBECCA LIGHIERI

NOUVELLE  
FORMULE

Baudelaire  
Maxime Gorki  
Colette  
Albert Cohen  
Marguerite Duras  
Camus  
Doris Lessing

# TOUT MÈRE

Les vénéneuses  
Les adorées  
Les ambiguës

## Nouvelle formule

- ◆ Chaque mois, 30 pages où les écrivains ont carte blanche
- ◆ Parutions, théâtre, cinéma, expositions : les rendez-vous littéraires à ne pas manquer
- ◆ Et toujours notre dossier par les meilleurs spécialistes

En vente  
actuellement



# Technocritiques

François Jarrige

« **A**rière, monstre aux naseaux de feu. On dit que tu apportes la civilisation, tu n'apportes que la barbarie. » C'est en ces termes, peu amènes, que Monseigneur Berteaud, évêque de Tulle, accueille en 1863 les premiers trains circulant sur la nouvelle ligne Périgueux-Brive que, contre tous les usages, il refuse de bénir. L'anecdote illustre la thèse originale de *Technocritiques* : contrairement à la vulgate, les rapides essors économique et technologique – qu'il s'agisse des Révolutions industrielles du XIX<sup>e</sup> siècle ou des Trente Glorieuses – ne se sont pas déroulés dans un culte béat et consensuel du « progrès », mais au contraire dans une angoisse généralisée et une critique tous azimuts, recrutant dans les milieux les plus variés... et jusqu'aux évêques.

François Jarrige, historien de l'université de Bourgogne, propose ici la première synthèse, aussi érudite qu'agréable à lire, sur l'histoire des contestations qu'a, de tout temps, suscité l'innovation technique. « Il ne s'agit ni de dresser une galerie de prophètes incompris, ni de rechercher dans le passé des justifications aux inquiétudes d'aujourd'hui. Il s'agit de montrer l'historicité des attitudes de refus face à la technique, par-delà les répressions et les disqualifications qui n'ont cessé de les accompagner jusqu'à les rendre invisibles » annonce-t-il en introduction.

Deux millénaires d'histoire des techniques sont ainsi passés en revue. Sur l'Antiquité, reconnaît l'historien, les sources manquent. Quant au Moyen Âge européen, il fut bien moins fermé qu'on ne le dit souvent à l'innovation, mais cette dernière visait à la qualité et l'originalité des produits, non à leur abondance ou à la diminution de leur prix. La montée des technocritiques – terme emprunté au philosophe Jean-Pierre Dupuy – commence avec l'introduction de la mécanisation de l'industrie textile à la fin du XVIII<sup>e</sup> siècle. C'est l'époque des premières révoltes violentes contre les machines, avec le mouvement luddite, au Royaume-Uni, entre 1811 et 1816, qui connaît un équivalent, plus tardif et diffus (auquel l'auteur avait consacré sa thèse) en France. Mais aussi celui du début du grand décrochage entre l'Europe (puis l'Amérique du Nord) et le reste du monde. Un des mérites du livre est, dans la lignée de la vogue de l'histoire globale, de traiter

des critiques de la technique en Afrique, en Inde, et autres régions longtemps colonisées ou dominées par la puissance de l'industrie européenne.

**Environnement, emplois et dignité.** Que disent ces critiques ? Chronologique, l'ouvrage n'en propose pas d'analyse synthétique. On est cependant frappé de voir combien, des contestations de la faux à celles des chemins de fer et de l'automobile, des machines à tisser à celles des OGM et de la surveillance biométrique, les mêmes arguments reviennent : la destruction de l'emploi ; la perte de savoir-faire garant de la dignité de l'artisan ou de l'ouvrier ; la destruction de l'environnement ; et, à mesure que le débat se complexifie, la question lancinante de savoir qui décide, au service de quels intérêts, de telle ou telle innovation.

Si les arguments des technocritiques ne varient guère, ceux de leurs opposants se reconfigurent sans cesse. « Si les critiques et oppositions aux techniques étaient interprétées au XIX<sup>e</sup> et au XX<sup>e</sup> siècle comme des preuves de l'ignorance populaire et d'un besoin de vulgarisation des sciences et des techniques, elles semblent désormais pensées comme le symptôme d'une crise de confiance nécessitant la mise en place de structures de dialogue entre entreprises, pouvoirs publics et profanes », constate François Jarrige.

À mesure que l'on se rapproche du présent, l'auteur quitte sa réserve d'historien et avance ses convictions. Lesquelles partent du constat que, contrairement à l'adage selon lequel on n'arrête pas le progrès, les exemples abondent de techniques jadis parées de toutes les vertus aujourd'hui abandonnées – les avions supersoniques – ou bannies – l'amiante ou le DDT. Aucune raison, donc, pour François Jarrige, « d'abdiquer devant l'avenir qui se construit à marche forcée », avenir qui, poursuivant la fuite en avant productiviste engagée depuis la Révolution industrielle, conduit de plus en plus manifestement à des désastres environnementaux. Mais au contraire une invite, résumant l'empathie de l'auteur pour les briseurs de machines et autres technocritiques radicaux à « renoncer aux trajectoires qui conduisent si manifestement à des impasses ». ■

**PAR Nicolas Chevassus-au-Louis**, journaliste et historien.



Sous-titre : Du refus des machines à la contestation des technologies, La Découverte, 2014, 28 €.



# Don't Look, Don't Touch, Don't Eat

Valerie Curtis

**L'**« effet sauce béarnaise » ne vous dit rien ? Pourtant, vous en avez probablement déjà fait l'expérience. À la suite d'une histoire très désagréable qui vous est arrivée après ou pendant que vous consommiez un plat, la seule idée de ce mets vous est devenue insupportable : vous êtes sous l'emprise dudit effet sauce béarnaise ! Son inventeur, le psychologue américain Martin Seligman, l'a nommé ainsi car il l'a éprouvé face à cette sauce : il a attrapé une grosse grippe après en avoir mangé, et même en sachant que la sauce n'y était pour rien, l'épisode l'en a dégoûté à jamais.

## La science du dégoût.

Alimentaire ou moral, biologique ou social, le dégoût est un phénomène multiforme qui peut intriguer des psychologues comme Valerie Curtis. La directrice du centre d'hygiène à la London School of Hygiene and Tropical Medicine propose un livre à la fois informatif et engagé. « Les gens sont dégoûtés par toutes sortes de choses sans s'en rendre compte, explique l'auteur de *Don't Look, Don't Touch, Don't Eat*. Cela influence nos vies subtilement de plusieurs manières, et il est très important que nous comprenions l'importance de cette influence. » La « dégoûtologue » définit et justifie donc le programme d'une science en plein développement, la « dégoûtologie ».

Comprendre les fonctions antimicrobiennes du dégoût peut être utile à la lutte contre les maladies. C'est alors la santé qu'il s'agit d'améliorer. Valerie Curtis explique, en multipliant les exemples, comment les politiques de santé publique

pourraient être plus efficaces en jouant sur les ressorts émotifs du dégoût plutôt que sur ceux de la rationalité. Le spectre des exemples s'étend de la lutte contre les maladies du « péril fécal » dans les pays du Sud à la lutte contre les épidémies de grippe dans les pays du Nord. En outre, mieux comprendre les pathologies psychiatriques liées à une sursensibilité ou à une sous-sensibilité aux objets de dégoût (nourriture, relations sexuelles, hygiène, etc.) pourrait aider le diagnos-

tic et le développement de traitements comportementaux ou chimiques idoines.

Comprendre les normes sociales de civilité autour du dégoût peut aussi aider à lutter contre la stigmatisation. Le rapport au dégoût pourrait être alors abordé de manière plus informée et plus humaine. Nombre de personnes exercent des professions considérées comme sales et souffrent de stigmatisation et de honte :

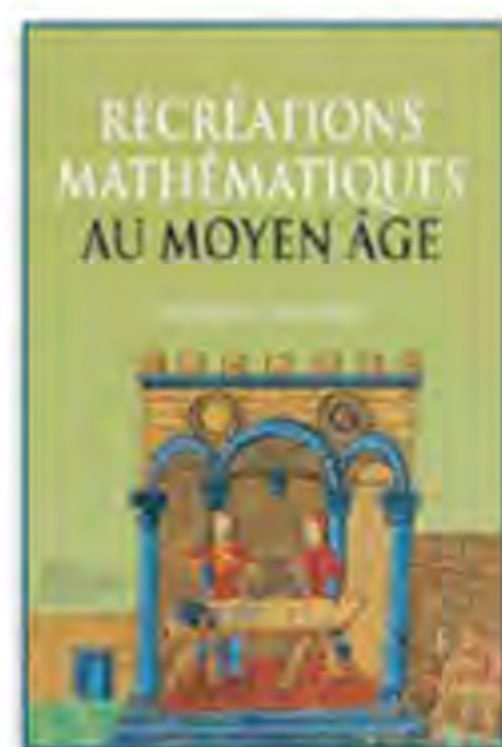
agents d'entretien ; travailleurs du sexe ; employés des abattoirs ; étudiantes menstruées de milieux défavorisés dans les pays en voie de développement. Face aux sentiments de dégoût et de honte, la réponse habituelle qui consiste à en rappeler l'irrationalité reste inappropriée, souligne l'auteur, car elle néglige l'aspect émotionnel du problème.

Valérie Curtis ne le cache pas, ce sujet ne déplace pas forcément les foules. Il lui est arrivé d'annuler des conférences faute de participants, espérons donc que la lecture du livre initiera un plus large public à la science du dégoût. ■ Julie Bouchard, maîtresse de conférences, université Paris-XIII/Labsic.



Sous-titre : *The Science Behind Revulsion, The University of Chicago Press, 2013, 165 p., 25 \$.*

## Mathématiques



## Récréations mathématiques au Moyen Âge

Jacques Sesiano  
PPUR, 2014, 290 p., 46 €.

**L**es amateurs éclairés d'énigmes mathématiques découvriront l'origine médiévale de nombre d'entre elles. Qu'il s'agisse de faire traverser sans dommage une rivière à un loup, une chèvre et un chou ; de distribuer un héritage ou de calculer la vitesse à laquelle un chien rattrapera un renard. L'auteur en livre de nombreuses versions anciennes avec leurs solutions et les équations nécessaires.

## Épistémologie



## Sciences et société Les normes en question

Collectif  
Actes Sud/IHES, 2014, 308 p., 28 €.



Un ouvrage riche de questionnements sur les rapports entre les sciences, l'éthique et le droit à travers le prisme des normes, ciment des sociétés. Les contributions des 15 auteurs, d'origines intellectuelles très diverses, permettent de comprendre comment se déploient normes et valeurs, en interaction, parfois en opposition, dans des lieux aussi différents qu'un tribunal, un laboratoire, une entreprise... Ce livre de la collection « Questions vives » codirigée par Marie-Françoise Chevallier-Le Guyader est une production de l'Institut des hautes études pour la science et la technologie, engagé dans les relations science-société.

### Philosophie des sciences



### La Science selon Henri Poincaré

Jean-Pierre Bourguignon (dir.)  
Dunod, 2013, 520 p., 18 €.

On a beaucoup écrit sur les contributions d'Henri Poincaré en mathématiques ou en mécanique céleste.

Moins à propos de son influence sur la philosophie des sciences. Le présent ouvrage met en lumière cet aspect, en rassemblant les textes, limpides, que ce formidable homme de sciences lui a consacrés.

### Neurologie



### L'Odeur du si bémol

Oliver Sacks  
Seuil, 2014, 352 p., 25 €.

On associe la plupart du temps les hallucinations à une forme de démence. À tort, nous prouve dans ce nouvel opus, et avec son brio habituel, le neurologue Oliver Sacks. Où l'on découvre à travers les expériences décrites par de nombreux patients que ces déformations du réel peuvent affecter, entre autres, les migraineux, les personnes atteintes de cécité, et aussi tout un chacun au moment de l'endormissement. Loin de stigmatiser le phénomène, l'ouvrage le valorise en narrant la richesse et la variété des expériences hal-

**TOUCHE PAS À MA SCIENCE**

**Médecine militaire**

Heureusement que le ridicule ne tue pas. Les forces armées égyptiennes auraient sinon déploré le 23 février dernier la disparition de leur chef Abdel Fattah al-Sissi, également ministre de la Défense et vice-Premier ministre, ainsi que du président de la République par intérim, Adli Mansour. Tous deux ont en effet assisté ce jour-là, sans s'émouvoir, à une bien étrange conférence de presse donnée par le général Taher Abdallah, commandant du département d'ingénierie militaire. Celui-ci y a très sérieusement annoncé que ses services avaient découvert un traitement efficace à 100 % contre le sida et à 95 % contre l'hépatite C. Le sang du patient serait soumis à des ondes électromagnétiques qui en élimineraient les virus. Et le médecin militaire Ibrahim Abdel-Ati, présenté comme responsable de cette avancée thérapeutique phénoménale, de préciser que de mystérieux interlocuteurs étrangers lui auraient proposé deux milliards de dollars pour qu'il la leur cède. Ce qu'il a bien entendu patriotiquement refusé. L'armée a indiqué que le traitement serait disponible en juin. Après l'élection présidentielle qui aura entre-temps porté au pouvoir le maréchal al-Sissi, celui-ci devenant par la même occasion thaumaturge suprême ? Ce ne serait que risible si, hélas, l'Égypte n'était pas le pays le plus touché au monde par l'hépatite C, avec une prévalence d'environ 15 % selon l'Organisation mondiale de la santé. ■ Luc Allemand

<http://bit.ly/HepatitisEgypte>

lucinatoires, qui peuvent être visuelles, musicales, mais aussi olfactives ou tactiles. Il livre également les hypothèses les plus récentes sur la manière dont le cerveau génère de si étranges perceptions.

### Écologie



### Plaidoyer pour la forêt tropicale

Francis Hallé  
Actes Sud, 2014, 212 p., 29 €.

Après sa contribution au film *Il était une forêt*, sorti sur les écrans en novembre 2013, le botaniste Francis Hallé veut continuer à mobiliser l'opinion en faveur des forêts tropicales. Pour cela, il nous y conduit, et nous explique ce que l'on peut y voir dans un langage très accessible, en s'appuyant sur une iconographie fournie. Il n'omet pas de souligner tout ce que l'on ignore encore, et que l'on n'aura peut-être pas le temps d'étudier, tant les menaces pesant sur ces écosystèmes sont nombreuses.

### Aérospatial



### Les Trésors du musée de l'air et de l'espace

Christian Tilatti (dir.)  
Le Cherche-Midi, 2013, 304 p., 28 €.

Ce dictionnaire, très soigné, présente des centaines de pièces du musée du Bourget, l'un des plus riches du monde en matière d'aéronautique et d'aérospatiale. Le classement par mots >>>



clés permet une mise en contexte, et l'on apprécie d'autant plus de découvrir l'histoire du moteur Antoinette, qui accumula les records dans les années 1900, ou celle des Véronique, fusées-sondes françaises des années 1960.

### Psychiatrie



#### Autismes

Bruno Gepner

Odile Jacob, 2014, 230 p., 23,90 €.

**L**e monde va trop vite pour de nombreuses per-

sonnes autistes qui ont du mal à adapter le rythme de leur monde intérieur à celui du monde extérieur. Ce décalage temporel induit chez elles des difficultés relationnelles et du stress. Telle est la théorie défendue par l'auteur, le pédo-psychiatre Bruno Gepner, enseignant à l'université d'Aix-Marseille. Il présente même dans ce livre une méthode en cours de test : un système qui permet de ralentir des séquences audiovisuelles (film, dessins animés) ayant donné des premiers résultats positifs auprès de jeunes autistes. L'auteur balaie aussi d'autres thérapies, plaidant pour une approche personnalisée des patients

en raison de la complexité des troubles autistiques.

### Astronomie



#### Concorde 001 et l'ombre de la Lune

Pierre Léna

Le Pommier, 2014, 125 p., 17 €.

**L**e 30 juin 1973, une équipe d'astronomes installés à bord du prototype Concorde 001, qui se déplaçait à vitesse supersonique, a suivi une éclipse de Soleil pendant la durée record de 74 minutes (au lieu des 7 minutes

et 4 secondes au sol). Pierre Léna, de l'Académie des sciences, qui lança cette aventure sans équivalent, nous la raconte en la replaçant dans l'histoire de l'astronomie aérienne.

### Philosophie



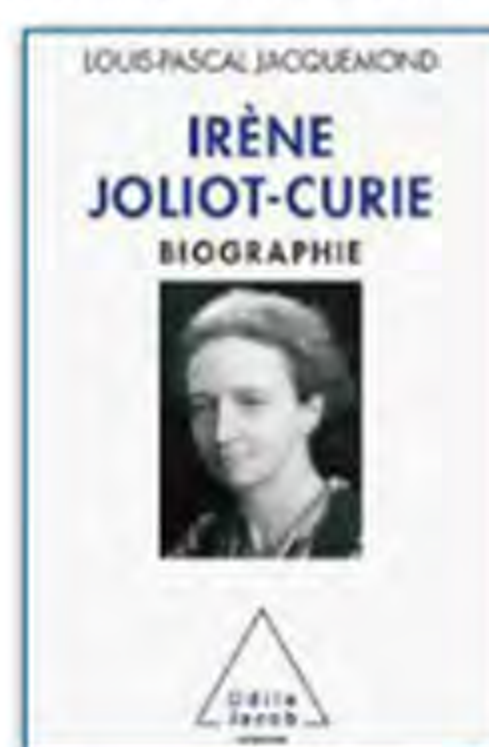
#### Histoire de la pensée médicale contemporaine

Bernardino Fantini et Louise Lambrichs (dir.)

Seuil, 2014, 531 p., 38 €.

**L'**épaisseur de cet ouvrage collectif ne doit pas rebutter le lecteur : chacun des 26 chapitres peut en effet être lu indépendamment. On y découvre avec intérêt, sous la plume très lisible de philosophes et d'historiens des sciences, les principaux courants de pensée qui ont façonné la médecine occidentale du XX<sup>e</sup> siècle. L'occasion de mieux comprendre l'émergence de spécialités telles que la génétique médicale et la médecine évolutionniste, le rôle de la science dans la production des pratiques médicales contemporaines, ou encore l'apport de l'informatique médicale en santé publique.

### Histoire



#### Irène Joliot-Curie

De Louis-Pascal Jacquemond

Odile Jacob, 2014, 369 p., 27,90 €.

**L**ouis Pascal Jacquemond, historien enseignant à Sciences-Po Paris, dévoile dans cet ouvrage complet et détaillé, diverses facettes de la fille de Marie et Pierre Curie. Irène Joliot-Curie fut à la fois Prix Nobel de chimie, ministre et militante des droits des femmes. Pour décrire le récit de sa vie, l'auteur a puisé dans la collection inespérée d'archives mise à disposition par les familles Joliot-Curie. Tout au long du livre, des extraits de la correspondance de plus de trente ans entre Irène Joliot-Curie et sa mère révèlent la personnalité de cette femme d'exception.

#### Et aussi :

##### Faire des enfants demain

J. Testart, Seuil, 2014, 216 p., 16 €.

##### Sur les épaules de Darwin, les battements du temps

J.C. Ameisen, Actes Sud, Babel, 2014, 448 p., 9,70 €.

### ANNIVERSAIRE

#### Au cœur du vivant, 50 ans de l'Inserm



**S'imaginer-t-on - cinquantenaire oblige - remonter à 1964 ? Erreur : c'est en 1941 que commence cet ouvrage, fruit du travail d'un spécialiste d'histoire contemporaine et d'un historien des sciences. 1941 et la création de l'Institut national d'hygiène, précurseur de l'Inserm. Dès lors, le ton est donné : ce livre ne raconte pas seulement l'évolution de la recherche médicale, et ses rapports parfois tendus avec la recherche clinique. Il ne se**

**contente pas de dépeindre l'émergence de nouvelles disciplines, et plusieurs grandes avancées biomédicales. Il est bien plus que cela. Car ses auteurs ont choisi de l'ancrer dans les enjeux politiques, sanitaires et sociaux des cinquante années écoulées. Le lire, c'est donc, aussi, découvrir toute une facette de la France contemporaine.**

Pascal Griset et Jean-François Picard, Le Cherche-Midi, 2014, 207 p., 34 €.



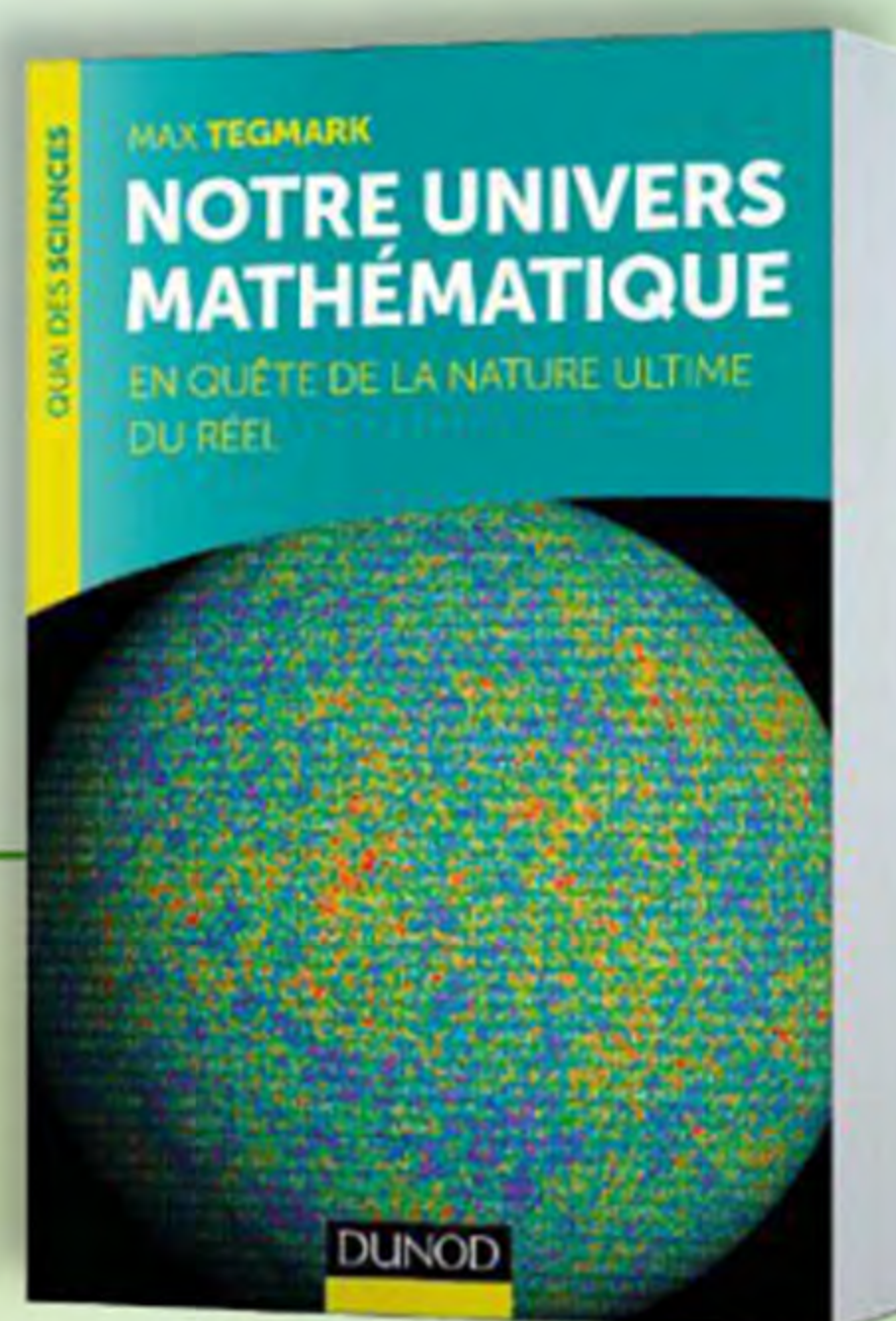
# LE PRINTEMPS DES SCIENCES



**L. SMOLIN**

9782100706679 ■ 320 pages ■ **24,00 €**

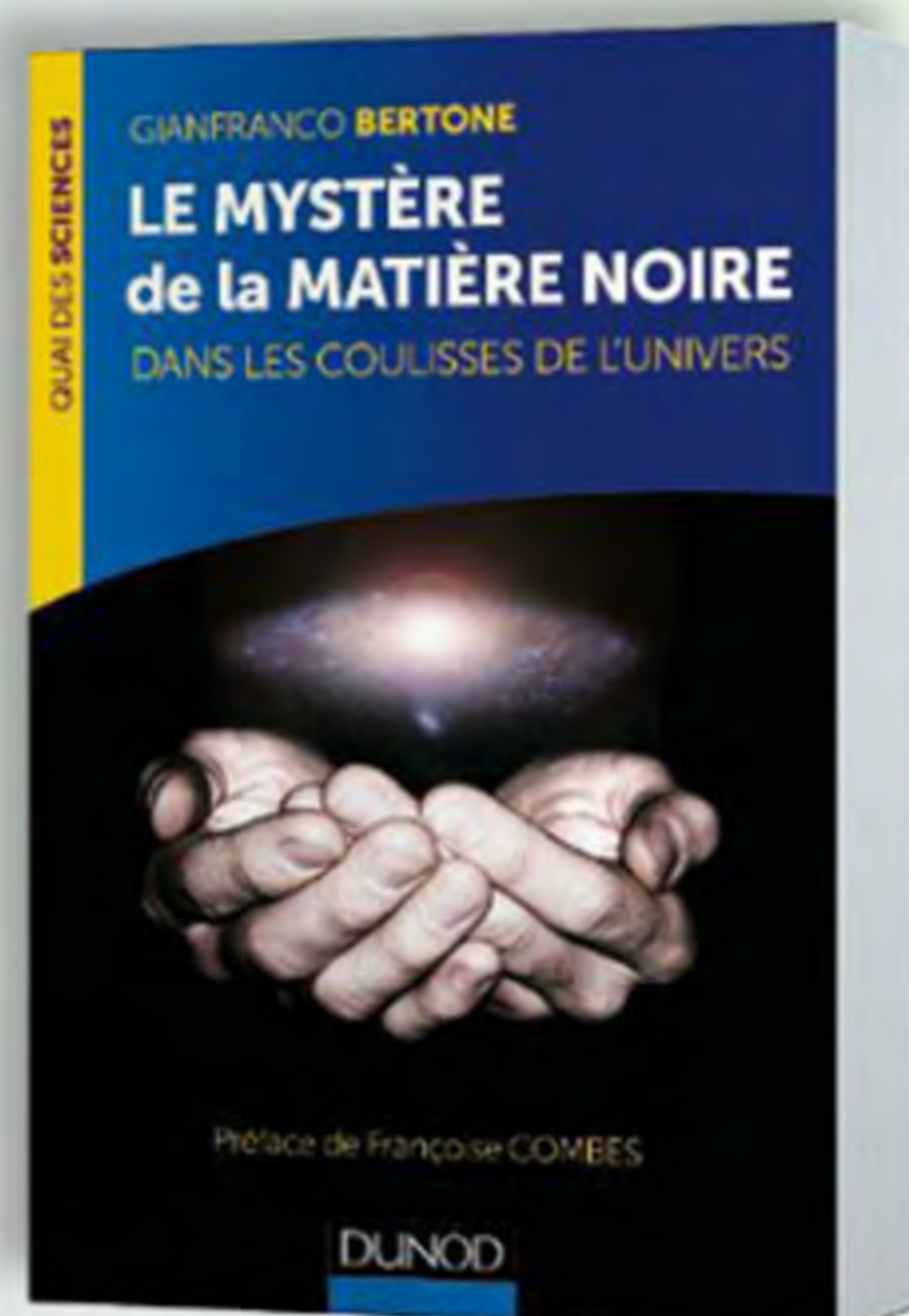
Lee Smolin, l'un des plus grands physiciens d'aujourd'hui, expose sa conception du Temps



**M. TEGMARK**

9782100570362 ■ 544 pages ■ **27,00 €**

Un voyage étonnant pour saisir la nature ultime de la réalité



**G. BERTONE**

9782100710201 ■ 224 pages ■ **18,90 €**

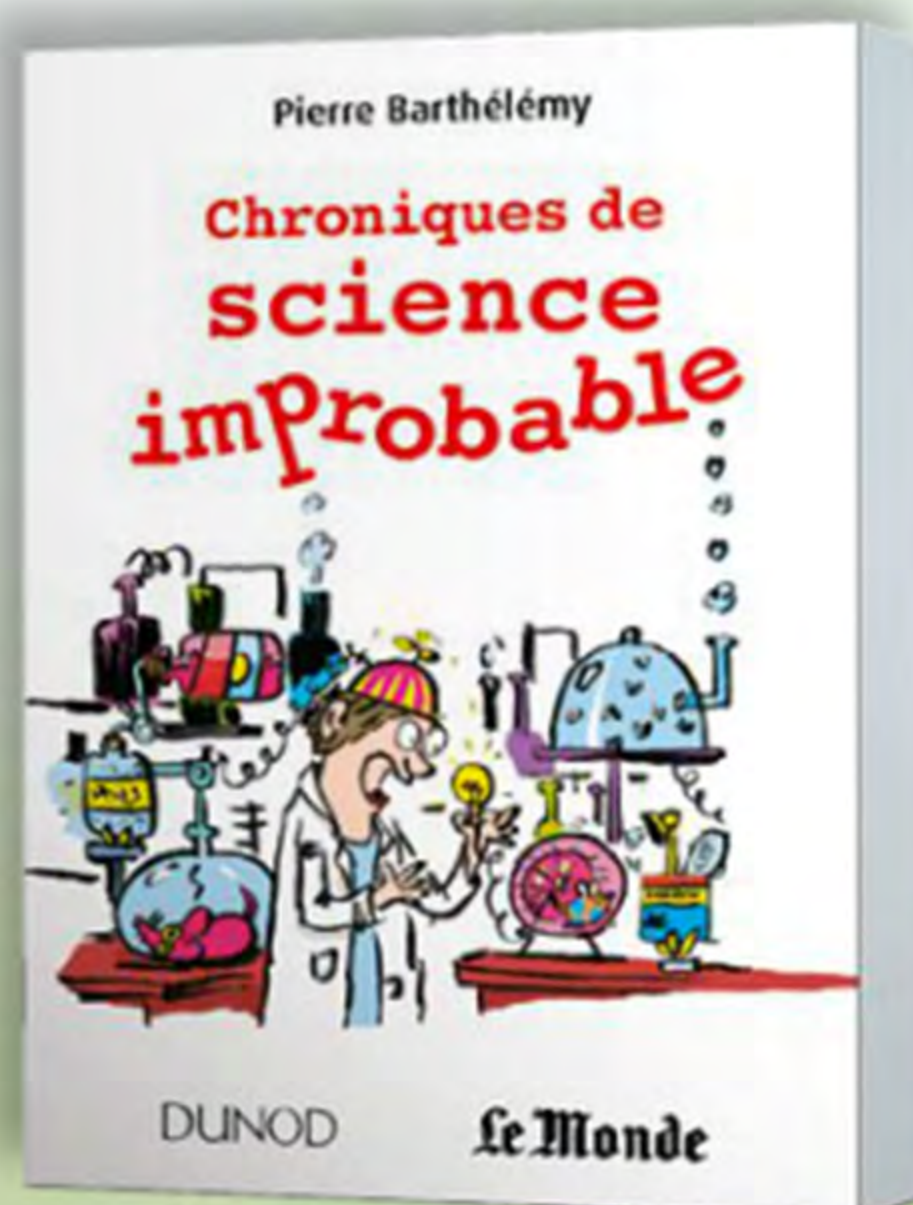
Un grand défi de la science : comprendre ce qu'est la matière noire



**LA RECHERCHE**

9782100710331 ■ 176 pages ■ **14,50 €**

Les controverses qui ont accompagné les plus grandes découvertes scientifiques

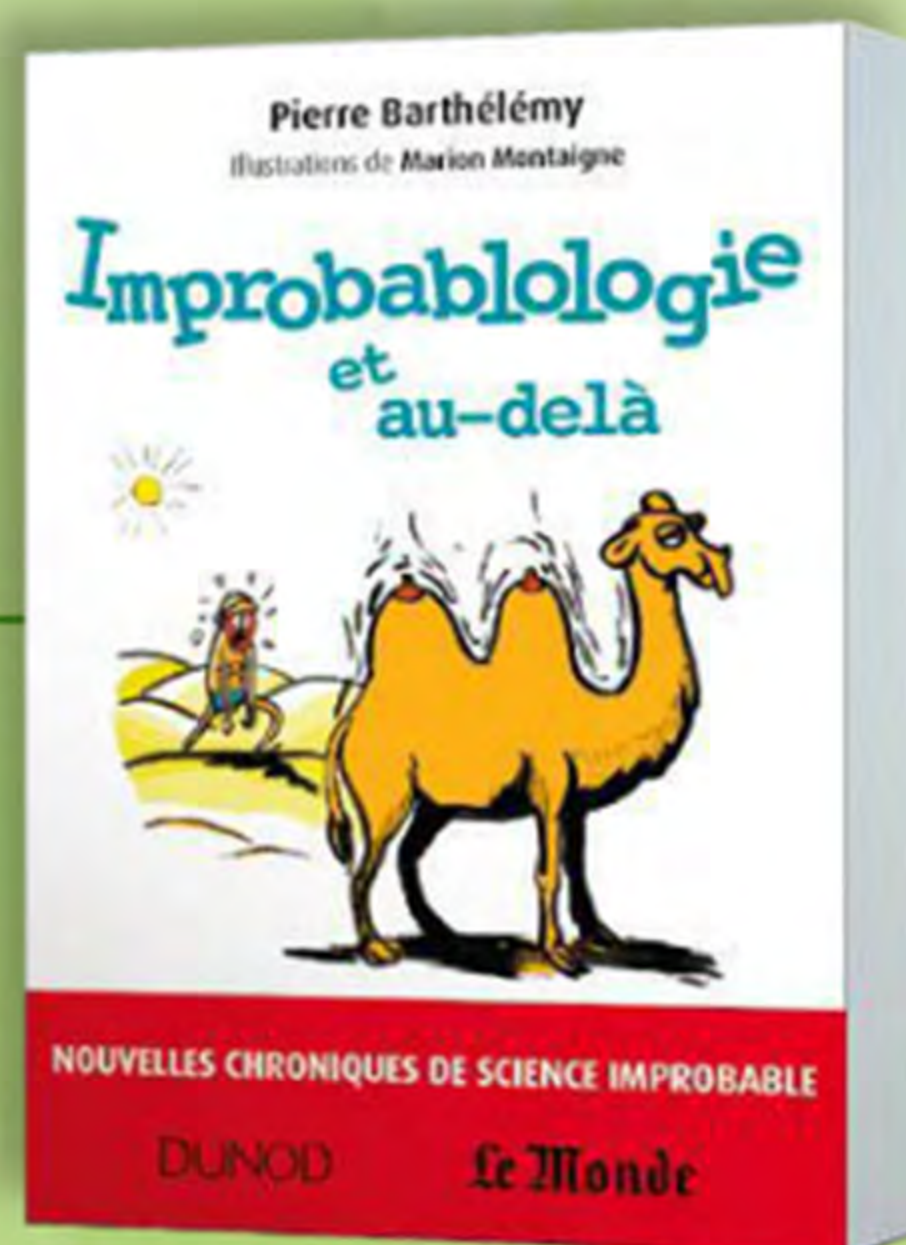


**P. BARTHELEMY**

Illustrations de Marion Moutaigne  
En partenariat avec Le Monde

9782100585335 ■ 176 pages ■ **12,90 €**

Les petits bijoux de la science improbable avec humour et délectation



9782100706662 ■ 176 pages ■ **12,90 €**

Nouvelles chroniques de science improbable : les réponses à des questions saugrenues

Tous nos ouvrages sont disponibles en librairie



[www.dunod.com](http://www.dunod.com)

**DUNOD**  
ÉDITEUR DE SAVOIRS



# Complétez votre collection...

**LA Recherche**  
l'actualité des sciences

## Les anciens numéros



### Année 2011

N° 452 mai 2011

Dossier : Mars, sur les traces de la vie.  
Événement : Le nucléaire civil après Fukushima.

N° 453 juin 2011

Dossier : Nucléaire et risques naturels.  
Événement : La première usine française pour les nanotubes.

N° 454 juillet-août 2011

Dossier : Sommeil et rêves, ce que révèlent les neurosciences.  
Événement : Les antirétroviraux limitent la transmission du sida.

N° 455 septembre 2011

Dossier : Un nouveau monde quantique.  
Événement : Des organes passent sous contrôle lumineux.

N° 456 octobre 2011

Dossier : Origines de la vie, les nouveaux scénarios.  
Événement : Immuniser des moustiques pour éradiquer la dengue.

N° 457 novembre 2011

Dossier : Le développement de l'intelligence.  
Événement : Des neutrinos supraluminiques interrogent la physique.

N° 458 décembre 2011

Dossier : Vers une gravitation quantique.  
Événement : Toucher par la pensée.

### Année 2012

N° 459 janvier 2012

Dossier : Le cœur artificiel.  
Événement : Le lac sous-glacière Vostok bientôt atteint.

N° 460 février 2012

SPECIAL : Les 10 découvertes de l'année.

N° 461 février 2012

Dossier : La physique de l'invisible.  
Événement : Les mystérieuses origines des fossiles de Doushanto.

N° 462 mars 2012

Dossier : Vaincre la douleur.  
Événement : Stradivarius, la fin du mythe.

N° 463 avril 2012

Dossier : Epigénétique, l'hérédité au-delà des gènes.  
Événement : Controverse autour d'un « supervirus » de la grippe.

N° 464 mai 2012

Dossier : La théorie de la complexité.  
Événement : Fertilité, les cellules souches bien cachées.

N° 465 juin 2012

Dossier : Troubles mentaux, l'escroquerie.  
Événement : Taux d'acidification record pour les océans.

N° 466 juillet-août 2012

SPECIAL : La physique du XXI<sup>e</sup> siècle.  
Événement : La saga de la grotte Chauvet.

N° 467 septembre 2012

Dossier : Comment Internet modèle notre cerveau.

N° 468 octobre 2012

Dossier : Les nouvelles voies de l'immunité.



N° 469 novembre 2012

Dossier : Boson de Higgs : Le pari gagné des physiciens.

N° 470 décembre 2012

Dossier : OGM : vérités & mensonges

### Année 2013

N° 471 janvier 2013

SPECIAL : Les 10 plus belles découvertes de l'année.

N° 472 février 2013

Dossier : Climat : Ce qui nous attend vraiment.

N° 473 mars 2013

Dossier : Comment notre cerveau décide.

N° 474 avril 2013

Dossier : Quand la matière émerge du vide.

N° 475 mai 2013

Dossier : Voyage dans le futur.

N° 476 juin 2013

Dossier : Perturbateurs endocriniens. Comment ils menacent notre santé.

N° 477 juillet-août 2013

SPECIAL : Cerveau. Comment notre cerveau perçoit le monde.

N° 478 août 2013

SPECIAL : 500 ans de controverses scientifiques.

N° 479 septembre 2013

Dossier : Énergie noire. Pourquoi l'Univers accélère.

N° 480 octobre 2013

Dossier : Comment naissent les espèces.



N° 481 novembre 2013

Dossier : La science de Stephen Hawking.

N° 482 décembre 2013

Dossier : Big Data. Traitement massif des données.

### Année 2014

N° 483 janvier 2014

SPECIAL : Le top des 10 découvertes de l'année.

N° 484 février 2014

Entretien : Peter Higgs raconte l'aventure du Boson.

N° 485 mars 2014

Dossier : ordinateur quantique.

## Les années complètes

45%  
d'économie

|                     |                     |
|---------------------|---------------------|
| 2002 : N° 349 à 359 | 2008 : N° 415 à 425 |
| 2003 : N° 360 à 370 | 2009 : N° 426 à 436 |
| 2004 : N° 371 à 381 | 2010 : N° 437 à 447 |
| 2005 : N° 382 à 392 | 2011 : N° 448 à 458 |
| 2006 : N° 393 à 403 | 2012 : N° 459 à 470 |
| 2007 : N° 404 à 414 | 2013 : N° 471 à 482 |

## Les numéros exceptionnels

- Jeux mathématiques
- La science en 22 mots-clés





**Vous pouvez retrouver l'intégralité des numéros disponibles sur le site [www.larecherche.fr](http://www.larecherche.fr) et les commander en ligne.**

## Les hors-série

- La physique en 18 mots-clés
- La biologie en 18 mots-clés
- Les sciences de la Terre en 18 mots-clés
- 365 énigmes mathématiques
- Spécial Jeux mathématiques
- Le Guide de l'emploi scientifique



## Les Dossiers de La Recherche



### Année 2011

- N° 42 : L'héritage Marie Curie
- N° 43 : La théorie du tout
- N° 44 : Les idées reçues en science et en technologie
- N° 45 : Neandertal, notre nouvel ancêtre
- N° 46 : La révolution des mathématiques

### Année 2012

- N° 47 : Les énergies de demain
- N° 48 : Dieu et la science
- N° 49 : La mémoire
- N° 50 : Les plus belles énigmes de la science
- N° 51 : Les pôles, enjeu planétaire
- N° 01 : La naissance

### Année 2013

- N° 02 : Les origines de la vie
- N° 03 : Les abysses
- N° 04 : Les particules élémentaires et de physique
- N° 05 : Jeux de mathématiques
- N° 06 : Addictions
- N° 07 : L'album de l'année 2013

### Année 2014

- NOUVELLE FORMULE**
- N° 08 : L'intelligence artificielle

**Et pour conserver votre collection précieusement**

**➔ l'écrin 12 numéros 24€ les deux**



| Tarifs (Frais de port compris) | France TTC  | Étranger TTC |
|--------------------------------|-------------|--------------|
| <b>Année complète</b>          | <b>45 €</b> | <b>55 €</b>  |
| Numéros                        | 7,50 €      | 8,50 €       |
| Dossiers                       | 8 €         | 9 €          |
| Hors-série                     | 6,50 €      | 7,50 €       |
| Numéros exceptionnels          | 8 €         | 9 €          |
| Écrin 12 n°                    | 13,50 €     | 16,50 €      |
| Lot de 2 écrins 12 n°          | 24 €        | 27 €         |

**Oui, je souhaite recevoir dans les 3 semaines :**

| Quantité | Indiquez ci-dessous les numéros souhaités                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|          | Années complètes : <input type="checkbox"/> 2002 <input type="checkbox"/> 2003 <input type="checkbox"/> 2004 <input type="checkbox"/> 2005 <input type="checkbox"/> 2006 <input type="checkbox"/> 2007 <input type="checkbox"/> 2008 <input type="checkbox"/> 2009 <input type="checkbox"/> 2010 <input type="checkbox"/> 2011 <input type="checkbox"/> 2012 <input type="checkbox"/> 2013 Soit _____ € |
|          | Numéros <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> Soit _____ €                                                                                                                                                                  |
|          | Dossiers N° : <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> Soit _____ €                                                                                                                                                                                                      |
|          | ■ La physique en 18 mots-clés Soit _____ €                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|          | ■ La biologie en 18 mots-clés Soit _____ €                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|          | ■ Les sciences de la Terre en 18 mots-clés Soit _____ €                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|          | ■ 365 énigmes mathématiques Soit _____ €                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
|          | ■ Hors-série : jeux mathématiques Soit _____ €                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|          | ■ Le Guide de l'emploi scientifique Soit _____ €                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|          | ■ Jeux mathématiques Soit _____ €                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|          | ■ La science en 22 mots-clés Soit _____ €                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|          | Écrin 12 n° : <input type="text"/> <input type="text"/> Lot de 2 : <input type="text"/> <input type="text"/> Soit _____ €                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|          | <b>Total de ma commande</b> _____ €                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |

Loi informatique et libertés : vous disposez d'un droit d'accès et de rectification des informations vous concernant et vous pouvez vous opposer à leur cession.

## Bon de commande

À retourner à LA RECHERCHE - BP 65 - 24 chemin Latéral - 45390 Puiseaux  
☎ 33 (0) 2 38 33 42 89 • Fax : 33 (0) 2 38 34 32 23 • Email : [ctartivot@wanadoo.fr](mailto:ctartivot@wanadoo.fr)

**J'indique mes coordonnées :**

V 487

Nom : \_\_\_\_\_ Prénom : \_\_\_\_\_

Adresse : \_\_\_\_\_

Code postal :     Ville : \_\_\_\_\_

Pays : \_\_\_\_\_

E-mail : \_\_\_\_\_

**Je règle aujourd'hui par :**

☐ chèque à l'ordre de La Recherche ☐ carte bancaire

N°

Je note aussi les 3 derniers chiffres du numéro inscrit au dos de ma carte bancaire, au niveau de la signature :    Expire fin :

Signature obligatoire :

**Votre commande sera expédiée à réception de votre règlement.**



L'origine d'énormes **rochers granitiques disséminés** des Alpes au Jura a divisé les géologues dès la seconde moitié du XVIII<sup>e</sup> siècle. La controverse a atteint son apogée quand on a imaginé qu'ils avaient été transportés par les glaciers.

# Le voyage des blocs erratiques



**Marie-Christine de La Souchère,**  
agregée de physique.  
mcsouchere@hotmail.com

**P**eu avant la Révolution française, une curiosité géologique fit naître une controverse : d'énormes blocs granitiques de milliers de tonnes, de plusieurs mètres d'envergure, disséminés un peu partout du Jura aux Alpes, perchés au sommet des collines ou gisant sur les flancs de montagnes calcaires, reposaient sur un sol qui leur était complètement étranger. Comme le géologue genevois Horace-Bénédict de Saussure se plaisait à le répéter, les granites ne se formaient pas dans la terre comme des truffes, et ne croissaient pas comme des sapins sur les roches calcaires !

La composition et l'âge de ces blocs, qui semblaient tombés du ciel tant leur nature différait de tout ce qui les environnait, les apparentaient aux hautes cimes des Alpes. Mais par quel miracle des cailloux et des blocs détachés de roches-mères aussi éloignées avaient-ils pu se retrouver égarés à de telles distances des sommets ? Seule une force colossale avait pu les entraîner, leur faire franchir tous les obstacles et les déposer aussi loin de leurs lieux d'origine.

Les hypothèses allèrent bon train. Le géologue français Déodat de Dolomieu imagina un gigantesque plan incliné reliant les Alpes au Jura qui, l'érosion aidant, avait disparu. Son confrère Jean-André Deluc avança, quant à lui, que la Terre était truffée de cavités souterraines remplies d'air. En s'enfonçant, la croûte terrestre avait provoqué la compression et l'explosion du fluide emprisonné, catapultant des masses rocheuses à travers les airs. Saussure lui objecta que la chute dans l'air de

masses aussi énormes, venant d'aussi loin que le centre des Alpes, aurait fracassé les rochers avoisinants et produit des excavations considérables. Or les blocs erratiques ne reposaient sur le sol qu'en très peu de points. Et cela n'expliquait pas pourquoi la plupart des blocs se trouvaient répartis à l'ouverture et en vis-à-vis des grandes vallées alpines.

Saussure estimait que seule l'eau avait pu les transporter. Y voyant le sceau du déluge universel et la trace d'une grande débâcle, il alléguait des débits d'eau gigantesques avec des vagues hautes de 800 toises (environ 1440 mètres). Cette hypo-

thèse des grands courants réunit rapidement la majorité des suffrages bien que l'on ne s'accordât guère sur leur origine : cataractes divines, lacs des hautes vallées ayant rompu leurs digues ou masses d'eau ayant dévalé les pentes lors des derniers soulèvements alpins.

*Ces énormes blocs de pierre égarés loin des sommets étaient la marque du déluge universel*

## Élévation de la Baltique.

Après la mort de Saussure, en 1799, les spéculations se pour-

suivirent, d'autant que le phénomène erratique ne semblait pas circonscrit aux Alpes et au Jura. Les plaines du nord de l'Allemagne étaient parsemées de blocs épars originaires de Scandinavie. Comment les flots avaient-ils pu charrier sur tant de kilomètres des rochers d'un tel calibre ? Pour l'expliquer, en 1804, l'Allemand Erhard Georg Friedrich Wrede imagina que l'axe de rotation de la Terre avait basculé et que le centre de gravité de la Terre s'était déplacé, élevant le niveau de la mer Baltique. Un refroidissement concomitant du climat aurait entraîné la dérive des blocs sur





**En août 1787, lors d'une expédition sur le mont Blanc, le géologue genevois Horace-Bénédict de Saussure, accompagné par son fils et des guides, observe d'énormes blocs de roche qui reposent en bordure du glacier.** © AISA/LEEMAGE

des radeaux de glace. La glace fondue, les blocs avaient coulé. Cette hypothèse expliquait au passage pourquoi les blocs erratiques exhibaient un profil anguleux au lieu des traces d'usure et de frottement habituellement constatées sur les pierres arrondies par l'action des eaux.

De son côté, le jeune géologue britannique Charles Lyell, constatant que des blocs erratiques d'origine scandinave parsemaient la campagne de l'est de l'Angleterre, affirma que ces derniers avaient été transportés par l'intermédiaire d'icebergs détachés du pôle Nord avant d'être entraînés par les eaux du déluge. Et, pour justifier la présence de blocs erratiques dans le Jura, le savant anglais d'imaginer qu'une partie de la Suisse avait jadis formé un immense golfe où des plaques de glace avaient charrié vers la rive opposée leur fardeau de roches tombées des cimes. Une hypothèse à laquelle le géologue allemand Leopold de Buch ne souscrivait guère. Celui-ci avait observé que les torrents boueux présentaient une capacité de transport supérieure à celle de l'eau pure. Se fondant sur la diversité des blocs erratiques, il avait imaginé plusieurs courants dévalant les pentes alpines et fournissant chacun son contingent de pierres. Et calculé qu'un soulèvement de la chaîne du Mont-Blanc aurait pu produire des flots de boue

d'une vitesse phénoménale, permettant sans problème à des blocs de plusieurs milliers de tonnes de remonter les pentes du Jura.

Grands courants, radeaux de glace, fleuves de boue, c'était compter sans le bon sens populaire. En 1815, pendant que les grands noms de la géologie confrontaient leurs positions, l'ingénieur des Mines Jean de Charpentier, directeur des salines de la région, explorait le val de Bagnes, en Valais. Alors qu'il était hébergé par un chasseur de chamois, Jean-Pierre Perraudin, la conversation roula sur les blocs erratiques. Perraudin était persuadé que ces derniers avaient été transportés et abandonnés par les glaciers, dont l'extension aurait été bien plus grande par le passé. Tout le val de Bagnes, selon lui, avait été occupé par un gigantesque glacier allant jusqu'à la commune de Martigny.

**Roches striées.** Sur le moment, Charpentier trouvant l'hypothèse extravagante, n'y prêta guère attention. Mais, trois ans plus tard, en avril 1818, Ignace Venetz, ingénieur chargé de diriger les travaux de vidange du lac glaciaire de Giétro, rencontra le même Perraudin, qui revint à la charge avec un nouvel argument. Il avait été frappé par les stries gravées sur les roches moutonnées des moraines glaciaires, traces selon lui des >>>



## Le voyage des blocs erratiques

» cailloux enchâssés dans la glace. Ces marques systématiquement orientées comme la vallée, dans la direction présumée d'écoulement des glaces, avaient subsisté après le retrait du glacier, délimitant son extension antérieure.

Après quelques expéditions sur le terrain, Venetz et Charpentier, ralliés aux vues de Perraudin, publièrent plusieurs articles sur le sujet, mais dans l'indifférence générale. Jusqu'à ce jour de l'été 1836 où Louis Agassiz, jeune et talentueux paléontologue de Neuchâtel, intrigué, rendit visite à Charpentier. Après cinq mois passés dans le canton de Vaud, à étudier moraines et blocs erratiques, Agassiz acquit la conviction que Perraudin avait vu juste. Et, le 24 juillet 1837, lors du discours d'ouverture des séances de la Société helvétique des sciences naturelles, alors que tout le monde attendait un exposé sur les poissons fossiles, le paléontologue brossa le tableau d'une époque lointaine où régnait un froid intense, un âge de glace où d'énormes glaciers descendus du pôle Nord recouvraient la plus grande partie de l'hémisphère Nord, atteignant les rivages de la Méditerranée et de la mer Caspienne. Ces glaciers, concluait-il, étaient les seuls et uniques responsables du transport des blocs erratiques !

« **Saint Saussure, priez pour nous !** » La réaction de l'assistance fut aussi rapide que violente. On avait du mal à contenir son indignation. Quelle indécence ! De quel droit ce jeune présomptueux osait-il s'attaquer à un sujet que leur collègue Buch, présent dans l'assemblée, avait si magistralement traité ? Lequel Buch, levant les bras au ciel, s'écria en latin « *Saint Saussure, priez pour nous* », et quitta la salle ! Plus mesuré, l'explorateur Alexandre de Humboldt, que toutes ces glaces faisaient frissonner, selon sa propre expression, invita le jeune homme à retourner à ses poissons fossiles. Lyell, absent ce jour-là mais qui ne tarda pas à être informé, se joignit aux protestations de ses éminents collègues. Tout le monde savait que la Terre, initialement en fusion, s'était progressivement refroidie au cours des âges. La Terre ayant toujours connu un climat plus chaud, les glaciers n'avaient pu avoir une étendue plus importante !

Que Goethe évoquât, dans son roman *Les Années de voyage de Wilhelm Meister*, « une période de froid pendant laquelle des blocs immenses de roches primitives auraient glissé sur des glaciers qui s'étendaient au loin dans les plaines et seraient restés gisants sur le sol étranger après la fonte de ces glaces », soit, mais on était ici entre hommes de science !



© UNIVERSAL HISTORY ARCHIVE/GETTY IMAGES

**En 1840, Louis Agassiz recensait les blocs de pierre et récoltait les signes d'extension glaciaire dans les Alpes depuis l'« hôtel des Neuchâtelois », proche du glacier de l'Aar.**

Loin de décourager Agassiz, ces propos accrurent sa détermination. Décidé à confondre ses adversaires, il aménagea un poste d'observation sur la moraine du glacier de l'Aar, au cœur de l'Oberland bernois, sous un bloc erratique en saillie, pompeusement baptisé « hôtel des Neuchâtelois ». Et, de ce camp de base, se mit à sillonner les Alpes, recensant les blocs erratiques et récoltant toujours plus d'indices de l'extension glaciaire. En août 1840, il reçut une lettre de Humboldt laissant paraître un fléchissement de l'opposition du savant allemand.

À l'automne suivant, invité par le géologue britannique William Buckland, qui avait séjourné à l'hôtel des Neuchâtelois, Agassiz se rendit en Grande-Bretagne. Buckland, jusque-là fidèle à la théorie des radeaux de glace, désirait néanmoins recueillir l'avis d'Agassiz sur certaines formes de relief. Lors d'une excursion en Écosse, Buckland lui montra la vallée de Glen Roy, célèbre par ses trois terrasses superposées ressemblant à des routes taillées dans les versants, et dont personne n'avait jusque-là donné d'explication. D'emblée Agassiz reconnut dans les routes parallèles de Glen Roy les niveaux successifs d'un ancien lac qui s'était formé lorsque les glaciers avaient barré la vallée. Bien qu'il n'y eût aucun glacier en Écosse, Agassiz découvrait un peu partout des signes de leur existence passée. Abordant une vallée, il prédisait l'endroit exact où l'on trouverait une moraine. Convaincu, Buckland contribua à la conversion de Lyell et d'autres géologues influents : la partie était gagnée.

En 1846, muni de 3 000 dollars octroyés par le roi de Prusse et d'une invitation à enseigner à l'université de Boston, Agassiz s'embarqua pour l'Amérique. Il ne devait plus revoir son pays natal. À sa mort, en 1873, un bloc erratique de 2 500 livres fut convoyé de Neuchâtel à Boston. Accomplissant le plus long voyage qu'il fût jamais donné d'accomplir à une telle roche. ■

### Pour en savoir plus

» Jean de Charpentier, *Notice sur la cause probable du transport des blocs erratiques de la Suisse*, Annales des Mines, 1835.

» Louis Agassiz, *Discours prononcé à l'ouverture des séances de la Société helvétique des sciences naturelles, à Neuchâtel le 24 Juillet 1837*, Actes de la Société helvétique des sciences naturelles, le 24 juillet 1837.

» Louis Agassiz, *Études sur les glaciers*, Jent & Glassmann, Neuchâtel, 1840.

» Jean de Charpentier, *Essai sur les glaciers*, Lausanne, Duclou, 1841.





- Au cœur des combats
- Des chevaliers de toute l'Europe
- Philippe Auguste et l'histoire de France
- Georges Duby a-t-il inventé Bouvines ?

**en vente actuellement en kiosque**



Le 4 mai, 14 h 15

## L'air, un liquide ?

**ANIMATION.** Les différents états de la matière et leurs transformations sont mis en évidence dans ce spectacle tout public à travers des expériences étonnantes : l'animateur fait rouler des billes d'air sur le sol, fabrique des glaces à la mayonnaise ou transforme une pomme en marteau.

Poitiers (Vienne), espace Mendès-France. <http://emf.fr/9641/lair-un-liquide-2>

Le 6 mai, 19 h 30

## L'eau dans le système solaire

**CONFÉRENCE.** L'eau est omniprésente dans le système solaire, sous forme de vapeur, de liquide ou de glace. Le géologue Pierre Thomas explique qu'elle a coulé sur Mars dans le passé, et qu'elle occupe plus de la moitié du volume des satellites et des comètes du système solaire externe, au point d'y constituer de véritables océans.

Paris, Institut d'Astrophysique. <http://tinyurl.com/conf-mardis-iap>

Du 6 mai au 10 juin

## La Terre, le vivant, la société : question de rythmes

**CYCLE DE CONFÉRENCES.** Le monde vivant a ses propres cadences, nos sociétés imposent leur rythme, et nos modes de vie ont un impact sur l'histoire géologique de la Terre. Chaque mardi, à 19 h, des scientifiques explorent la façon dont s'imbriquent ces différentes échelles de temps.

Paris, Cité des sciences et de l'industrie. <http://tinyurl.com/conf-college-cite>

Le 10 mai, 14 h 30

## La formation des systèmes planétaires

**CONFÉRENCE.** La découverte d'exoplanètes a conduit les chercheurs à revoir leurs idées sur la formation du système solaire et des systèmes planétaires en général. Ainsi, les planètes océans ou les astres de glace font aujourd'hui partie des objets célestes étudiés. L'astrophysicien Olivier Mousis aborde les mécanismes qui mènent à la genèse de ces mondes exotiques.

Besançon (Doubs), observatoire. <http://tinyurl.com/conf-samedi-cnrs>

Le 13 mai, 20 h

## La mécanique de l'origami

**CONFÉRENCE.** Une feuille de papier pliée présente des comportements mécaniques particuliers, lors d'un étirement, d'une torsion, ou de son vieillissement. Benjamin Thiria, chercheur en mécanique, explique comment les plis forment des structures complexes qui aident à comprendre les feuilles d'arbres ou les ailes des coccinelles.

Bourges (Cher), Muséum. <http://tinyurl.com/pb5qekn>

Le 14 mai, 19 h 30



## Les nouveaux seigneurs des océans

**CONFÉRENCE.** Les méduses, d'apparence assez rudimentaire et qui semblent avoir traversé les âges, sont effectivement particulièrement robustes et profitent des déséquilibres que nous infligeons aux océans : Jacqueline Goy et Robert Calcagno, de l'Institut Océanographique, dressent le portrait de ces animaux et analysent le rôle de l'homme dans leur pullulation actuelle.

Paris, Institut Océanographique. <http://tinyurl.com/p4xr5la>

Le 15 mai, 20 h 15

## Science, technique : différentes formes de modélisation

**CONFÉRENCE.** La recherche scientifique passe par un travail de modélisation, c'est-à-dire de simplification du réel. La conception technologique, en revanche, consiste souvent à imaginer avant de construire une réalité complexe. Armand Hatchuel, professeur à l'école des Mines ParisTech, développe la comparaison de ces deux processus.

Toulouse (Haute-Garonne), centre international de conférences de Météo France. [www.science-animation.org/fr/notre-actualite](http://www.science-animation.org/fr/notre-actualite)

Le 15 mai, 20 h 30



## Science en cour(t)s

**FESTIVAL.** 15 courts-métrages écrits, interprétés et réalisés par des doctorants autour de leurs travaux de thèse sont présentés pour cette huitième édition du festival. Les domaines scientifiques abordés vont des mathématiques à l'anthropologie, en passant par la chimie, l'optique, la sociologie ou la biologie.

Rennes (Ille-et-Vilaine), le Diapason. [www.sciences-en-courts.fr](http://www.sciences-en-courts.fr)

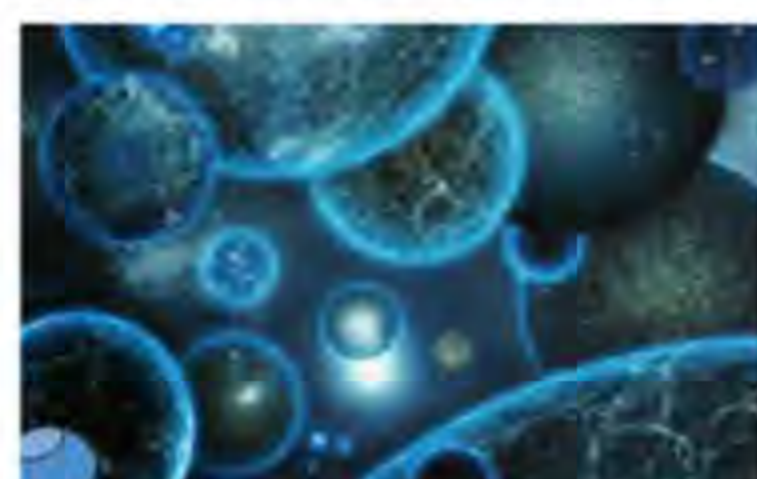
Le 15 mai, 18 h

## Des robots inspirés des insectes

**CONFÉRENCE.** L'abeille s'oriente grâce à ses yeux sensibles au mouvement. Ce phénomène a inspiré la fabrication de robots capables de naviguer sans heurter les obstacles. Franck Ruffier, de l'Institut des sciences du mouvement, explique que ceux-ci ont en retour aidé à comprendre les prouesses des insectes.

Marseille (Bouches-du-Rhône), CNRS. <http://tinyurl.com/paca-jeudis-cnrs>

Le 16 mai, 20 h 30



## Vivons-nous dans un Univers ou un multivers ?

**CONFÉRENCE.** Les théories qui sous-tendent notre compréhension de l'Univers sont aujourd'hui ébranlées, explique le chercheur

## Le souk des sciences

Les chercheurs s'installent en ville et viennent à la rencontre des habitants avec le Souk des sciences. Ils proposent au public des animations accessibles à tous, amusantes et participatives, pour faire découvrir des secrets de la nature ou de nouvelles technologies et aiguïser la curiosité scientifique. Les 18 stands couvrent des disciplines très variées : la physique, avec les chercheurs Julien Deschamps et Alexandre Escarguel, la biologie avec Florence Vincent, ou encore l'archéologie avec la

médiévisite Valérie Lauze. À l'occasion de l'année internationale de la cristallographie, ce sujet est mis en avant par des expériences qui montrent comment faire pousser des cristaux et font découvrir leur symétrie.

Le 23 mai à Marseille, Cours Belsunce, le 28 à Aix-en-Provence, Allées provençales, le 13 juin à Digne, et à Gap, le 24 juin.





## Anniversaire

➤ **HAROUN TAZIEFF**, décédé en 1998, aurait eu cent ans cette année. Ingénieur, il avait consacré une partie de sa vie à l'étude des volcans. Il fut notamment chef du service de volcanologie de l'Institut de physique du globe de Paris puis secrétaire d'État chargé de la prévention des risques technologiques et naturels majeurs de 1984 à 1986. Mais il est surtout connu pour ses expéditions dans le monde entier, et ses nombreux livres et films grand public sur la volcanologie. Plusieurs événements lui rendent hommage ce mois-ci à Privas (Ardèche). Le 15 mai a lieu une représentation de la pièce de théâtre *La Sexualité des volcans*. Le 16, une table ronde réunit des scientifiques ainsi que ses anciens compagnons, qui reviendront sur sa carrière. Et le 17, une promenade contée propose de partir à la découverte de la géologie locale.

➤ <http://tinyurl.com/programme-centenaire-tazieff>

en cosmologie Aurélien Barrau. Selon lui, l'existence d'univers multiples pourrait apporter des réponses aux difficultés rencontrées. Il expose les conséquences scientifiques et philosophiques de cette hypothèse.

**Marseille (Bouches-du-Rhône)**, observatoire. <http://tinyurl.com/paca-univers-multivers>

Le 21 mai, 18h

### Comment la vie peut-elle naître ?

**CONFÉRENCE.** Malgré les progrès de la biologie moléculaire, les scientifiques ne savent pas encore construire le vivant à par-

tir des briques élémentaires. Le biologiste Robert Pascal raconte comment les chercheurs essaient d'élaborer des approches expérimentales pouvant mener à la réalisation de systèmes présentant certains caractères du vivant.

**Châtellerauld (Vienne)**, salle du verger. <http://tinyurl.com/ems-naissance-vie>

Du 21 au 25 mai

### Fête de la nature

**FESTIVAL.** « Herbes folles, jeunes pousses et vieilles branches » sont au programme de cette nouvelle édition de la fête de la Nature, sur le thème des plantes sauvages.

Parmi les nombreuses visites et ateliers animés par des scientifiques, le public est invité à participer à des inventaires des plantes rares et protégées, en ville comme en forêt.

Dans toute la France. [www.fetedelanature.com](http://www.fetedelanature.com)

Du 26 au 31 mai



### Festival Artec

**FESTIVAL.** Pendant une semaine, les amateurs de robotique se réunissent pour relever des défis technologiques autour du thème de la préhistoire. Les robots conçus par les participants sont soumis à des épreuves telles que planter des graines dans un champ, ramener des fruits ou du bois jusque dans leur caverne, ou encore s'entraider pour réaliser une fresque.

**La Ferté-Bernard (Sarthe)**, salles Athéna et Olympe. [www.festival-artec.fr](http://www.festival-artec.fr)

Le 28 mai, 20h30

### Histoires de zéros

**CONFÉRENCE.** Une des traces les plus anciennes du zéro date du troisième siècle avant notre ère.

D'autres formes sont apparues à différentes époques en Mésopotamie, en Inde, en Chine, ou en Amérique centrale. Ces signes expriment-ils tous la même idée ? L'historienne des mathématiques Christine Proust montre la diversité des notions auxquelles renvoient les différentes formes de ce symbole.

**Montpellier (Hérault)**, centre Rabelais. <http://tinyurl.com/agora-savoirs-abc>

Jusqu'au 8 juin



### La radioactivité : de Homer à Oppenheimer

**EXPOSITION.** Qu'est-ce que la radioactivité ? Cette exposition la présente sous différents aspects : elle rappelle comment cette propriété de la matière a été découverte, explique comment elle est utilisée, dans des applications militaires ou médicales, et quels en sont les risques. Le visiteur peut réaliser lui-même des mesures de la radioactivité naturelle.

**Paris**, palais de la Découverte. <http://tinyurl.com/palais-radioactivit-homer>

# La Recherche

## Dossier

### L'horloge biologique, manager de notre santé

Vous êtes du « soir » ou du « matin ». Vous n'y pouvez rien : c'est votre horloge biologique qui en décide. À chaque personne son « chronotype ». Lequel n'aime pas être perturbé : de plus en plus de données prouvent que dérégler son horloge biologique accroît significativement les risques d'obésité et de diabète. Inversement, en tenir compte permet de mieux traiter des maladies graves, tel le cancer.

## Le mois prochain dans

### Savoirs

Le bitcoin est-il l'avenir de la monnaie ?

### Entretien

Maîtriser la biologie de synthèse

N° 488 • EN VENTE LE 22 MAI 2014



## Emballer c'est séduire un peu

Pour séduire sa belle et tenter de la conquérir, le mâle *Paratrechalea ornata*, une araignée semi-aquatique, lui offre, de sa bouche, une proie soigneusement emmaillottée dans du fil de soie blanche. Si aux yeux de la femelle le cadeau lui-même prime, il semblerait que l'emballage aussi joue un rôle déterminant dans le choix du prétendant, comme l'ont montré trois chercheurs de l'Institut d'investigation biologique Clemente Estable en Uruguay. Après avoir capturé plusieurs spécimens de cette espèce et peint la bouche d'une partie



des mâles en blanc, couleur du fil de soie, ils ont remarqué que les prétendants blanchis obtenaient plus rapidement les faveurs de ces dames. En fait, ce procédé permettrait aux mâles, surtout actifs à l'aube et au crépuscule, d'être plus vite repérés en portant un objet clair bien visible quand la luminosité est faible. Les femelles distingueraient aussi mieux les soupirants les plus sains des boiteux, ces derniers usant de moins de soie (et de soin) pour confectionner le paquet cadeau.

<http://tinyurl.com/spider-sexuality>

## La fenêtre et l'oiseau

Voici qui rassurera les chasseurs sensibles. Ils représentent une menace assez faible pour les oiseaux. C'est en tout cas le bilan avancé par une étude américaine qui estime que l'une des plus grandes causes de mortalité d'origine humaine chez les bêtes à plumes serait la collision avec les fenêtres des immeubles. D'après les calculs des chercheurs, plus de 100 millions d'oiseaux perdraient la vie chaque année en Amérique du Nord après la rencontre, inopinée et de plein fouet, d'une vitre. Une hécatombe chez ces volatiles têtes en l'air, dont l'ennemi numéro 1 lié à la présence de l'homme reste le chat domestique.

<http://tinyurl.com/birds-collisions>

## Crocodiles perchés



Comme si les crocodiles et autres alligators n'étaient pas assez effrayants au sol ou camouflés sous la surface de l'eau, voilà qu'une étude publiée dans la revue *Herpetology Notes* nous explique qu'il n'est pas rare de voir ces reptiles grimper aux arbres. Ce comportement a été observé chez plusieurs espèces des continents africains, américains et jusqu'en Australie. Pour expliquer ces envies de prendre de la hauteur, les scientifiques avancent deux explications. La première, ce serait une place de choix, au sec, pour se réchauffer. La seconde, un tel perchoir offrirait à l'animal un poste d'observation idéal pour fuir plus rapidement ou, dans une moindre mesure, détecter des proies. Petite consolation, plus l'animal est gros, plus il peine à se hisser en haut d'une branche...

<http://tinyurl.com/climbing-crocodils-pdf>

## Vive la mélancolie

A quoi bon écouter de la musique triste si c'est pour s'enfoncer plus encore dans la mélancolie ? Peut-être pour obtenir l'effet inverse. Une étude parue dans la revue *Psychology of Music* et réalisée par des chercheurs britanniques et irlandais a montré que dans certaines circonstances les notes susceptibles de vous tirer quelques larmes auraient également le pouvoir de vous remonter le moral ! Tout dépend en fait de ce que vous cherchez : parmi les 220 personnes consultées pour cette étude, celles dont l'humeur s'est améliorée avaient choisi d'écouter la mélodie pour sa beauté. En revanche, celles qui cherchaient dans cette musique triste des réminiscences de moments précis de leurs vies ont vu leur état empirer !

<http://tinyurl.com/m2rqzys>





# CONCOURS GÉNÉRATION DÉVELOPPEMENT DURABLE

Inventer pour le monde de demain  
[www.concoursgenerationd2.com](http://www.concoursgenerationd2.com)

**10<sup>e</sup>**  
ANNIVERSAIRE  
2014



DÉCOUVREZ  
LES 3 LAURÉATS  
à l'occasion du Forum  
Science, Recherche & Société

**REMISE DES PRIX**  
**JEUDI 22 MAI**  
**À 12H45 AU CNAM, PARIS**

Plus d'informations et inscriptions sur :  
[www.forum-srs.com](http://www.forum-srs.com)

Catsal'Design - iStockPhoto - Shutterstock

Un événement

**LA Recherche**  
L'actualité des sciences



Bouygues  
Immobilier

Avec le soutien de

**ANOUS**

autolib'



letudiant.fr

eco

plus  
le webcampus



# Je suis Sociétaire CASDEN, donc je vote !



**En mai, la CASDEN tient son Assemblée Générale annuelle.**

Ses Sociétaires vont pouvoir participer à la vie de leur coopérative selon le principe « **une personne, une voix** ». Voter, c'est s'impliquer. C'est montrer son attachement aux valeurs de la coopération. C'est vivre différemment sa banque.

**Vous êtes Sociétaire ? N'oubliez pas de voter en ligne ou par courrier\* !**

**En savoir plus sur [www.casden.fr](http://www.casden.fr)**

\* Clôture du vote le 13 mai 2014 ou à défaut de quorum le 27 mai 2014 à 15 h, heure de paris.  
Tout bulletin papier reçu après le 11 mai 2014 ou à défaut de quorum le 25 mai 2014  
ne pourra être pris en compte.

**casden**   
BANQUE POPULAIRE

CASDEN, la banque coopérative de l'éducation, de la recherche et de la culture